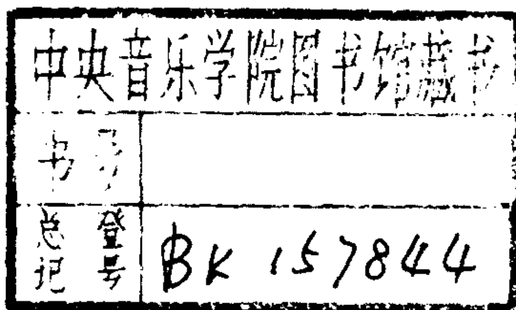


目 录

前 言

除了各门学科本身的不断发展、深化、提高、扩展以外，当前的科学、文化发展有以下三个显著的特点：

一是各种学科的交叉渗透达到了一个新的阶段。如果说两门自然科学之间的交叉，如生物物理、地球化学等可称之为第一类交叉学科，自然科学向社会科学的渗透，数理统计用于经济学、社会学等可称之为第二类交叉学科，而进入本世纪六、七十年代以后，则是自然科学、技术科学、社会科学、人文科学以至于艺术和哲学等各种门类的学科的交汇和融合，这是第三类交叉学科。当前，无数交叉性的新学科如雨后春笋般出现，已经分不清楚是属于哪种科学的门类了。越来越多的跨不同门类学科的专家在一起合作，并且出现了不少兼通两种或多种学科的专家学者。

当代科学发展的第二个特点是主体与客体的统一，而这种统一是以人为中心的。本来，不论是科学、技术以至全部文化艺术，都是人类所造、为人类所用的。随着人类社会生产力水平的迅速提高和精神文明的不断进步，人们已有更多的时间和能力，在满足不断提高的物质生活的同时，接受更好的教育，从事精神文明的创造，获得艺术享

受。人们越来越清楚地看到自身的价值。“人是世界上最复杂的真理的结晶”（马克思）。

当代科学文化发展的第三个特点是计算机渗入所有的学科领域。

音乐与物理的关系，加上人们对音乐的创造和接受，正好体现了这三个特点。

音乐是一种声波，可以把他称作为音乐声波。因此，它具有机械纵波的一切属性。在研究音乐声的时候，自然有与振幅有关的能量问题，如声强、声压、声能分布形成的声场、音乐声的传远和衰减等等问题；有频率域、时间域、相位域问题，如各种声谱、旋律、节奏、立体声等问题；或与声的传播速度有关的一系列问题，如音乐声波在各种介质中的传播，音乐声波与温度的关系等问题；波的传播和叠加问题，如音乐声的反射、吸收、独立传播、拍的现象等等。乐器本身是一种产生音乐声的物理仪器，它的分类、材料的性质、结构、振动的模式、声学参数、调试、维护、测量、表演等无不涉及物理问题，电声乐器的发声原理及调试加工、音响设备、音乐在厅室里的传播、歌唱发声的原理以及研究音乐的方法等，也都离不开物理。

很久以前就准备写一本有关音乐与物理之间关系的小册子。但是，究竟应该怎样写才能既生动活泼、新颖，又有一定的深度。直到最近我把这几年在北京大学对学生开设的“音乐声学概论”课程的内容成书以后，才重新着手此事。

本书力图通过音乐的外在表现讲明其物理基础，包括与音乐有关的主要物理内容，既能包括有关音乐声的比较

经典的内容，又包括新的发展内容，有深有浅，适合不同程度的读者。本书还试图从当前科学与艺术发展的特点和共同规律，来讨论音乐与物理的关系。

本书涉及内容范围较广，一定会存有不当之处，衷心希望批评指正。

在写作本书过程中得到和明霞、孟祥鹏、毕思胜、孟瑶等同志的大力协助，在此向他们表示诚挚感谢。

第一章 绪论

§1 音乐与自然界

音乐是什么?这是自古以来人们不断探索的一个课题.不同的时期,从不同的角度,人们有不同的见解.

可以说音乐是人们心灵的呼唤,人类感情的升华,科学与艺术的结合,也可以说音乐不过是声波的一种而已.

古人曾经认为,音乐是一种自然的反映.古希腊人曾把音乐的标志画成一张弓,上面有弦,有箭.弓箭是一种狩猎的工具,而其本身又是一种乐器.这种标志作为一种音乐的象征一直演变流传至今,如(图1-1).中国古代也传说,黄帝命一位名叫伶伦的乐官到西山采集竹子,作为十二律的律管.这些都反应出音乐来自自然.在人类掌握自然规律不足时期,喜欢任意的类比,在我国古代就有人曾把音乐中的六律和六吕,即黄钟、大吕、太簇、夹钟、姑冼、仲吕、蕤

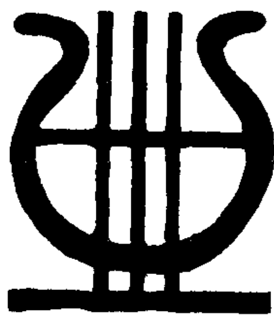


图1-1 音乐的标志

宾、林钟、夷则、南吕、无射、应钟依次对应从十一月到次年十月的十二个月份，如下表，这当然是无科学根据的.

应钟	无射	南吕	夷则	林钟	蕤宾	仲吕	姑洗	夹钟	太簇	大吕	黄钟
十月	九月	八月	七月	六月	五月	四月	三月	二月	一月	十二月	十一月

不管是西方还是东方，都有人把音乐与颜色对应起来. 就算是大科学家在未知事物面前也不免流俗，如牛顿曾以赤、橙、黄、绿、青、蓝、紫对应于C、D、^{b}E、F、G、A、^{b}B七个音名：

赤	橙	黄	绿	青	蓝	紫
C	D	^{b}E	F	G	A	^{b}B

自然界司空见惯的声响：潺潺的小河流水，唧唧的虫声细语，或是自然界有节奏的回声，阵阵的海浪拍岸，声声的林涛起伏……都已经进入了我们的音乐之中，而且还用电子合成器来模拟和仿制.

让自然的某种存在，如色彩、温度以至于人的呼吸来调制音乐，甚至把复杂的生物分子结构利用计算机与音乐对应起来等等. 这也许是人类回归自然的一种表现，也是当前科学与艺术发展的一个趋势.

§2 音乐声学——科学与艺术结合的宁馨儿

科学与艺术的关系在近几年又被不少人重新提出来了．事实上它是一个一直被前人先哲们争议不休的古老课题．自古至今，多少科学家、艺术家、哲学家对此发表过他们的真知灼见．有人强调他们之间的差别，认为“科学探索大自然，而艺术则探索人的心灵”，“科学著作的生命很短，而艺术则永葆青春”．有人则强调它的共性，认为“艺术家的猜想与科学家的发现多么相似”．直到现在，人们仍在争论：未来属于科学还是属于艺术？

早在古希腊时代，科学与艺术就是相互沟通、相互渗透、并存发展的．在声学的发展过程中，音乐与物理、数学一直密切相关．许多科学家、哲学家认为，科学的谐和与艺术的谐和都是美的体现．

然而到了中世纪以后，科学与艺术在形式上分了家，并各自向着自己学科的深入方向发展，内容也越分越细，这当然是一种进步．但是，一道不可逾越的鸿沟在科学和艺术之间形成了，并且在人类发展的相当长的时间里，人们对它们的共性没有作更多的强调．

随着近代科学的发展，人类又重新认识了科学与艺术之间不可分割的内涵所在．正如19世纪法国文学家福楼拜所说：“艺术越来越科学化，科学越来越艺术化，两者在山麓分手，有朝一日，将在山顶重逢”．而今天这种重逢已并

非是一种简单的握手，而是有着更深更广的内涵，更新的形式和表现．这也正说明了人类文明正在攀登一个新的高峰．

当前，科学与文化的发展，除了有各门学科各自的前沿以外，还有三个特点：一是各种门类学科，包括自然科学、社会科学、技术科学、哲学和艺术等学科的交叉与渗透；二是作为主体的人和客观世界的融汇和结合，人们越来越看到自身的价值；三是计算机的渗入．音乐就处在这三个特点的交汇处．以往以研究音乐的客观基础及乐器发声为对象的科学——音乐声学，现在已涉及到物理学、音乐艺术、电子学、计算机科学、生理学、心理学、美学等学科．因此，现代的音乐声学已经是一门与高科技结合的新的交叉学科．（图 1-2）

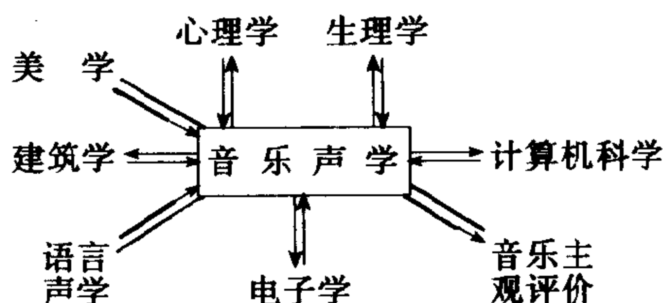


图1-2 音乐声学与各学科的关系

科学与艺术有许多共同的规律．比如：

要素构成规律：即每个学科的各个层次，都是由一些要素构成的．音乐的物理实质是振动的传播．振动由强弱、频率、时间等要素构成．反映到主观听感上，又有音调、响度、音色和时值等要素．而这些要素的汇合又形成了高一层次的旋律、节奏、和弦、曲式等．这些高一层次的要素又进一步形成了不同的音乐风格和体裁．又如物理学的各

个分支也无不由一些基本物理量汇合而成.

形式规律：包括对称、节律、统一、对比、均衡、比例、变化、主从、运动、装饰、符号规律学等. 例如：构图要均衡，物体结构要均衡，心理要平衡；音乐有节律，天体有运动周期，经济发展也有节律；音乐有装饰，美术也有装饰等.

量的规律：自然科学是定量的，这不容置疑. 社会科学，如国力评估、物价指数等，也是定量的. 在艺术的范围里，如：音色的感觉、音乐的评价等等都是朝着定量的方向发展，电子计算机应用于艺术，更促进了量化的过程.

创造规律：音乐与物理及其他学科一样，需要创造性思维. 如归纳，抽象、演绎，多元化的思维触角，信息反馈等，这些都是普遍的. 形式方法、结构方法、移植方法、模拟方法等发明创造方法，不管在哪里都是行之有效的.

学科思想规律：各个学科的各个局部均有其具体的指导思想，如物理思想、建筑思想、发明思想、文学创作思想、音乐创作思想等.

美的规律：人间万物充满着美，有自然美、音乐美、技术美等. 一切美好的事物总是人类所向往的. 追求美是人的天性.

在这本小册子里，我们把音乐声学作为科学与艺术结合的产物来对待，把它放到当今时代的列车上，站在纵观当前科学、文化发展特点的高度，从科学与艺术结合的角度，自觉地应用科学与艺术的共同规律，以发展的眼光去叙述音乐与物理的关系. 在以后的章节中，我们将选择一些问题来一一进行讨论.

§3 是音乐还是物理
——声学发展的历史

声学是自然科学中最古老的学科之一．在人类诞生以前，自然界即有声源的存在，如雷声、风声以及海浪拍击声、山崩地裂声等．



图 1-3　希腊毕达哥拉斯和他的学生们从事音乐研究

声学从一开始就与音乐分不开．从古希腊时代起，毕达哥拉斯就研究重量不同的铁锤敲击能发出不同的音，得出重量与发声的高低有关的结论（图 1-3)．继后，伽利略用不同弦线的振动研究音的高低．18、19 世纪的克拉尼研究膜、竿、板的振动图案．19 世纪的亥姆霍兹提出的和声理论，至今仍是声学研究中的重要基础．亥姆霍兹认为，乐音是空气的周期振动引起的，乐音可以用音调、响度和音色区分，由泛音的数目及强度决定音色．19 世纪爱迪生发明记录声音的机器，用来记录声音．如今，英国的音响博物馆还有世界上第一次记录下来的“玛丽有只小羊羔”的珍贵资料．

我国声学发展史中，主要的成果是乐器制造．曾侯乙编钟集中反映了我国在几千年前声学的成就．编钟跨有五个八度的音域；用十二律并兼有五度、三度关系；有六个调记录；有标准音高；而且发展了有两个基频的编钟．另外，我国古代对于共鸣的研究，弦的振动、管的音调的研究等都是通过乐器来进行的．

从近代的声学发展来看，在电声发展中，音乐电声占有很大的比重．建筑声学中音乐厅、歌剧院、电影院、多功能场馆的建筑都是与音乐离不开的．语言声学的研究与音乐声学有许多处是相重叠的．心理声学与生理声学当然与人的歌唱发声、噪音结构及对音乐的接收和感受分不开．声学学科中对乐音的测量始终是一个不可缺少的内容．计算机科学中，计算机音乐是一个正在兴起的分支．不仅是可听声，谐波中的超声部分对音乐也是起作用的．

声学无非是研究声的发生、传播、接收、声的性质以

及声与其它物质的相互作用．无论国内外，从历史到现在，研究发声常常是用弦和管的发声来进行的．在声源的研究中，音乐又常常是重要的．声的传播也用钟、弦的传声远近以及室内乐音的传播来研究．对于提高音质的要求也莫过于音乐声．共振、驻波的研究也用的是琴弦、琴室等．因此可以说，声学的发展离不开音乐．

§4　一件人人皆有的乐器
——人体乐器与歌唱

会演奏一件乐器还不如有一副好嗓子．从婴儿降临人世的第一响哭声，就使用了“人体乐器”，从此参与了人生生命历程的“大合唱”．

歌唱是人声唱出的音乐，这是一种最古老而又最自然的音乐．按传统观点，人的歌唱与乐器发声并列，是音乐的两大组成部分．

人体的各个与发声有关的器官就好像是一件乐器的各个部件．有人把“人体乐器”比喻为一件管乐器，另一些人比喻为簧振乐器，还有人则比喻为簧管乐器．现在，让我们先看一看“人体乐器”的结构和组成吧．

无论哪一种乐器发声，都要有个动力即能源．不管把人体看作管乐器或簧振乐器，“人体乐器”有一个声能源，它也在“乐器”本身里面．歌唱是用横隔膜把肺部中的空气“顶”上去，使声带振动，或者是在咽腔、鼻腔、口腔里发声和共振．我国古代民间常用词“丹田之气”，“以气

托声”等亦属此意.

人体乐器的发声部分是气流经喉管中的声带的调制并经咽腔、鼻腔和口腔等的共振. 而口腔还包括有舌头、舌根、下巴的影响.

人体乐器有三个共鸣腔，即咽腔、鼻腔和口腔（至於民间艺人的语言，可能还有别的说法），它们直接起共鸣的作用.

不管怎样，人体乐器是世界上最复杂的乐器：它有众多的部件，而且所有的部件包括声带、咽腔、鼻腔、口腔以及舌头、下巴等都是活动的、可调节的；在唱歌时差不多全身的肌肉、肢体都在运动，而且视觉系统、神经系统也在协调工作，寻找自我配合、自我完善，并参入合唱、伴奏配合；它是一件没有定形的乐器，因为每一部件都可以随时调节而处于不同的运动状态；它是一件可以自由控制的乐器，可以控制真假嗓音及各种唱法，如西洋美声唱法，中国美声唱法，中国戏曲唱法，通俗唱法等；而且人体乐器是因人而异，每个人都是不同的.

因此，人体乐器的潜力是无限的，它可以开发出无穷无尽的新功能，创造出越来越好的音色，使人们越来越方便地掌握它.

§5 美好音乐享受的背后
——一场音乐会中的音乐物理问题

到现场去听一场音乐会，在一个具有高度物质文明和

精神文明的社会里，对于一个普通劳动家庭来说，是一个节日．这是一种文化，一种享受，也是一种感情的交流，还可以说是一种美的升华．然而你知道吗？在音乐中还包含了许许多多的物理问题．

报幕员出来了，如果是一个不用扩音设备的音乐厅，那他站的地方一定是舞台正中偏前的位置，在这个位置上讲话，全场听起来最清晰，声音也最响．北京中山公园音乐堂的舞台干脆做成一个扇面，报幕员站在扇面的焦点上．

音乐厅的听众大厅，有的做成长方形，有的是扇形．顶棚有的高，有的低．四边的墙壁常常用木板做成“孔隔”、“窝状”．这些都是通过声音的反射来控制声音的音质及其在大厅内的分布．还有，帷幕、座椅、顶板、墙壁、地毯等都有吸声的问题．

乐队上来了．为什么第一小提琴、第二小提琴、中提琴、大提琴和大贝司之间有一定数量比例？为什么弦乐器与管乐器之间又有一定数量比例？所谓单管制、双管制、三管制的管弦乐队配置又意味着什么？乐队在舞台的位置如何？同一类乐器处在一起是为了什么等等．这里包括有音量问题和音色问题，即声音的叠加和强弱的配比，而在强弱的比例中又还有音色的配比．

各种乐器的发声机理当然是物理问题，不同的乐器有不同的音色，因此，乐器之间都有着传统的“搭配”．乐器的分类方法最普遍的也是最科学的是按其发声的物理机制分类．

和声、和弦、声音的协和以及中国唢呐的“不合群”等也是一种物理现象．而配器，也无非是各种音色、音量的

搭配和穿插. 你能同时听到并分辨出不同乐器，这是由于声波独立传播的性质造成的.

如果剧场用了扩音器，或者是录音设备，那么，舞台上分布的、乐队前摆放的、歌唱者手里的传声器，俗称“麦克风”，无论从其类别、性能、放置位置、高度、相互间的距离等都是不同的. 这些都是音乐电声问题. 音乐电声问题还有音箱的类别、性能、个数、放置位置等. 弄得不好，还会有反射声与歌唱声脱节，扬声器发出尖叫声等.

舞台上现在有声控的音乐灯光，也是靠声音的强弱去控制的.

§6 音乐的自然科学基础
——音乐的物理内容

既然我们明确了音乐是声音的一种，现在，让我们从学科的角度来看一看音乐的物理内容. 由于声音是振动的传播，因此，物理学就是音乐的自然科学基础，音乐中包含着许多的物理内容.

音乐的产生，也就是音乐声源，如弦振动、簧振动、膜板体振动、人的歌唱以及电振荡等属物理声学问题.

音乐在各种场合的传播，涉及声的反射、折射、绕射、吸收和隔声等也是物理内容.

电声音乐中的换能是把音乐的振动转换成电的振动，然后进行加工、控制，这是电学和声学的换能，也包括信号处理、调制、放大等物理内容.

乐器制造实际上是一件发声的物理仪器的制造.

音乐的测量，包括频率、强度、时间、频谱、动态等都是物理测量. 制造乐器的许多材料性能测量也都是物理测量.

研究音乐性质如音质好坏、振动模式等，都是利用物理方法.

音乐声的心理、生理实验方法，实际就是物理实验方法在音乐中的运用.

音乐研究离不开物理，但是，物理又不是音乐的唯一内容，音乐声学还要把物理和生理、心理因素结合起来，例如：

音质的好坏，除了客观地用物理仪器测量以外，还要有主观评价. 要把主观评价的客观基础与主观感受联系起来. 因此，音乐要反映主体与客体的关系，这里也有审美问题.

人对音乐的感知大多是通过耳朵的. 立体声效果是建立在双耳效应的基础上. 耳朵的能分辨阈值，包括对音调的差别、声强的差别、时值的低限等，都要与客观的物理量结合起来考虑，这是音乐与生理的直接关系. 还有，音乐反映人们的心理状态，传递人与人之间的感情，这又是音乐与心理学的关系.

现代音乐已经跨入计算机时代，这个问题在下节中将专门进行讨论. 音乐与激光、电子学、无线电等高科技都有着广泛的联系.

因而，我们介绍音乐物理基础的同时，还要与电子学、建筑学、计算机科学、心理学、生理学、美学等联系起来，

也就是说，现代音乐声学是一种多门类的学科交叉，是一门既古老而又崭新的边缘学科.

§7 音乐与高科技的结合——计算机音乐的内容

当今的时代是高科技的时代. 计算机的诞生促成了新的技术革命，已经深深地改变了世界的面貌. 计算机已经进入人们生活的各个方面，因而，进入音乐也是不可避免的. 同别的领域一样，计算机进入音乐，必将对音乐带来深刻的变革.

有一种说法是，认为我们下面讲的音乐电脑演奏系统或 MIDI 系统就是计算机音乐，这是不够的. 计算机音乐包括的内容极为广泛，几乎传统音乐涉及的一切方面，计算机都可以渗入. 计算机还使音乐开拓了前所未有的广阔天地. 可以认为，凡是音乐与计算机有联系的各个方面都属于计算机音乐. 从已有的材料来看，计算机音乐包括有以下内容：

音乐的数字合成. 利用计算机技术，可以合成已有的各种音乐声和各种音色，也可以合成自然界中以及现有世界上还未有过的声音. 音乐的数字合成可以用于电子合成器，音源块，鼓机（节奏发生器），电子琴中的音源片等.

音乐的数码录音，这是把音乐信号取样后，经过 A/D 转换把模拟信号数字化并编码，变成记录信号贮存；然后再放音，经 D/A 转换重现音乐. 数字录音的优点是频响好，

保真度高，动态范围广，重放精度高，多次复制不会降低质量，记录密度高，体积小等等. 音乐的数码录音技术现在发展得很快，越来越简便，已经可以直接录、存、放和多次重录了.

音乐的数字控制. 这是指对数字化了的音乐信号进行编辑加工，也可用于实时控制. 电脑音乐喷泉，色彩音乐等也是一种数控.

乐器数字接口. 就是MIDI，这是一种实时地传输音乐的定时信息和控制信息的一组数字编码，以及传输这些数码的硬件接口的技术规范. 80年代后MIDI技术已经得到很大发展和被迅速推广使用. 利用MIDI技术制作音乐，一个人或很少人就可以做出有整个乐队的音乐效果来，从而使电子音乐更加迅速传播和被应用.

计算机作曲. 包括一是计算机的随机作曲，实际上，不可能是彻头彻尾的随机作曲，那将是无法入耳的，总是规定一些条件，然后让计算机在一定范围内随机作曲. 二是按一定规则的逻辑作曲. 三是计算机作曲的最高形式即智能作曲，这是人们的期望. 利用计算机特有的音乐语言、技术性能和表现手法，可以作出有独创性的音乐作品.

计算机辅助作曲. 可以用计算机输入，贮存、重放音乐. 由于可以用琴键输入，实时记录下来，并重放音乐或重现乐谱，所以可以算作辅助作曲. 如果你不会演奏琴键，还可用机键把音乐“键”（“敲”）入. 计算机辅助作曲也包括自动配和弦，配伴奏等. 还可以按一定曲式、调式、和弦变化、节奏型、旋律音型、音乐的织体等，根据你键入的几个音编成曲子. 目前已有这样现成的软件，可以奏出

有酷似一定风格的音乐. 背景音乐也可以用计算机来创作，如电影、电视及一般记录影片的音乐背景，不需要规格完整的曲式，可以给出一个“动机”、“意图”，用计算机去发展出各种旋律. 也可以给出一组具有特征的乐节“素材”，让计算机作随机组合，或按一定程序连接及变换速度、音色等.

计算机记谱、读谱和机器人演奏. 把音乐录音用计算机实时记录成谱，已有一些尝试，但面临的困难很大，最难办的是确定音调的游移和速度的变化. 用计算机读谱也是一种设想，机器人演奏将随技术水平的进展而推进.

用计算机对音乐作品进行分析已经有一段历史了，包括有音程分析、调式分析、节奏分析、模式识别、动态分析等，还可以进行长时间的频谱分析等等.

把计算机作为数学工具可以对音乐理论进行研究，还可以利用计算机的大容量和高速度，对音乐的本质，内在规律，与自然、与其他科学、与人类的思维活动及其他活动有哪些规律性的联系或相似等方面进行研究.

用计算机作为实验手段对音乐进行研究有如：谱分析、瞬态分析，用作音乐工作站，利用 A/D 转换研究乐器的振动模式、应力分布、结构参量等. 音乐电声的室内声场效果、自动调整与均衡也用的是计算机技术. 进一步可以把计算机用来探索听觉和音乐的本质等.

计算声学作为计算物理的一个分支领域，可以研究音乐厅、居室、舱船、文艺厅、火车车厢、乐器等的形状结构与声学效果的关系.

利用计算机还可以有效地进行音乐教学. 可以把文字、

谱表、图形与声音结合起来．还可以作人机对话，判改作业．用游戏的方法进行教学，可以大大增加人们的学习兴趣，提高学习效率，收到好的学习效果．例如最近北京大学音乐声学与计算机音乐研究室开发了中华学习机的音乐卡和软件，用很少时间教音乐的基本理论、练习听音程、分辨和弦等，收到了较好的学习效果．

例如从传统的观念看，音乐只是自然界和人类能发生的声响中的一部分，而计算机则可以制造出自然界中从未有的声音，音乐的范围一下子就得到无限的扩展；又如过去常常以传统的乐器和人声为模本，用电声模拟它们的音色，而计算机音乐则可以另树一帜；再如在音律上，也冲破了传统的五声、七声、十二律、二十四律等规范，而有了无限自由的天地；还有，利用音的数字合成，把许多效果声引入音乐，因而计算机音乐继乐器声和歌唱声形成了音乐声的第三大领域．

计算机进入音乐也赋予音乐以许多新的概念和思想．例如，作曲的思想方法和程序都会产生改变．可以从新的音色或节奏入手，而不一定从“动机”开始；作曲家将在合成器或计算机上作曲而不在纸上作曲；作曲家还可以取代演奏家和乐队；音乐的织体也可以打破传统的模式而予以新的构架；对传统的和声学也一定会有所突破，产生新的和声理论和效果；音乐已不仅仅是艺术的范畴，而是一种艺术与高科技结合的产物等等．

计算机进入音乐，还会产生新的心理感受和审美标准，这是必然的．因为每一种新的艺术形式的出现，必然会导致对原有审美观念的修改，如对于“音色美”，过去都认为

丰满、柔和、圆润、清纯是美，现在可能加上怪诞、新奇等；又如旋律过去是以悠扬、流畅为美，现在可能加入曲折、跳跃等；可能节奏美的比重会高于旋律美；合成器音乐也正在开辟自己的新风格.

计算机大大促进了音乐研究的深化，可以用数学的、定量的方式去研究音乐，表现音乐. 例如，如何表现音色，应该把它提高到更科学的高度，把许多术语进一步量化等.

计算机可以促进音乐水平的提高和音乐教育的普及. 高质量的教学音源已进入家庭，包括激光唱机及收听电台的广播等. 这将使人们可以随时听到高质量的音乐，从而当然会提高人们的音乐素质和欣赏水平；“卡拉OK”的普及，使人们增加了音乐实践的机会，使群众的歌唱水平和听音能力大大提高，计算机音乐演奏系统的普及，使得各种场馆、各种业余团体和组织都有能力置备，从而促进了音乐活动的普及；具有越来越多音乐功能的计算机进入家庭，对普及音乐的概念已不再是识谱、唱准，而是进入和声、作曲的水平了.

计算机音乐也促进了音乐与其他门类科学技术的结合. 如音乐的数字录音、数字控制、合成器制造等，是与电子技术的结合，音乐与医学的结合开辟了许多新的天地；计算机促进了音乐与数学、物理学、心理学、教育学的结合，计算机也促进了音乐与其他艺术形式，如灯光、色彩、舞台艺术等的结合.

第二章
音乐的声学基础

§1 为什么我们的耳朵能听到窗外传来的歌声
——声源、声的传播介质和声接收器

人们要能听到声音，首先要有个产生声音的源头即“声源”. 对于音乐来说，其声源无非就是人的歌唱，乐器的演奏，从广播、收录机、唱机、音箱或扬声器中传出来的音乐声等. 当然，有时把风声、涛声也纳入音乐之列. 这些可以统说是一些音乐声源.

只有声源，人的耳朵还是听不到声音. 声音是一种机械波，即机械振动的传播. 机械波的传播是需要一定介质的. 如果是在室内听窗外的歌声，那就是从声源发出的声波通过空气这个介质传播到我们耳朵里. 有过这样一个实验：在一个钟罩里放一个正在响的老式闹钟，如果把钟罩里的空气抽去，这时你可以看到这个闹钟的铃锤还在动，然而几乎听不到声音. 这就是说声音是靠空气作介质来传播的.

除了气体以外，固体和液体也能传声. 人们把耳朵贴在铁轨上，可以听到远处的火车声，而把耳朵离开铁轨则

听不到，这说明固体传声要比空气更快些. 用耳机听音乐有很好的效果，其中也包括着通过头颅的固体传声. 液体也能传声，我们在游泳池的水里照样也能听到岸上播放的音乐，而且很清楚.

声波在介质中传播时，总是会逐渐减弱的. 从远处送亲队伍飘来的吹打音乐声，会随着队伍的远去而越来越轻. 这是由于从一个点源发出的声波，其有限的能量随着波的散布、距离的扩大而扩散到越来越大的空间，因而单位空间里的能量就会越来越少；另一方面也是因为波在传播中由于存在吸收而使能量不断消耗. 所以，如果我们要抑止或者减弱不需要的声音时，就可以采取隔声或者吸声的措施. 所谓吸声，实际上就是采用一些材料让声音通过这种介质时增大损耗，使透射或反射部分减弱.

声波传播到两种介质的交界面上时，一部分被反射，一部分透射. 两种介质的特性声阻抗，即介质的密度与声音在这个介质里的传播速度的乘积相差越大时，反射部分就越大，透射部分就越小. 例如：大块厚玻璃板就可以使声音大部分被反射回去，使透射部分变小，起隔声作用.

人们要听到音乐，还要有声音的接收器，耳朵是每个人都有的最自然也是最灵敏的声音接受器. 中国古代甲骨文中的声字就是这样写的："ዋ᎒"，即有一个耳朵在听. 繁体字的声字是"聲"，也有耳朵.

因此，声源、介质和声接收器三者是听到声音缺一不可的先决条件.

§2 听得到的音乐与听不到的音乐
——乐音和噪声、基频和谐波，音乐声的组成

人们通过把机械波按其频率——每秒钟振动的次数，而分为次声、可听声、超声以及特超声等.

一般的分法是，振动频率在20赫兹以下，即每秒钟振动20次以下的叫作“次声”. 地震前兆的大地振动，海洋、大气里传播的气流振动，原子弹爆炸或一些机器产生的声波中，都可能有次声波. 有些次声波有很大的能量和破坏力.

振动频率在20至2万（20k）赫兹之间的声波叫作“可听声”，即人耳可以听得到的声音. 当然，对于每个人来说，可听的范围可能不同. 一般说，年轻人可以听到低至20赫兹，但老年人则连50赫兹也听不见了；青年人可以听出高至20k赫兹的声波，但老年人则常对12k赫兹也是聋子，因为听觉随着年龄而老化.

振动频率在20k赫兹以上的叫超声.

在可听声里，人的歌唱声大概从60赫兹（男低音）到2500赫兹（女高音）. 钢琴的最低音是27.5赫兹，最高音是4086赫兹. 除了特大的管风琴以外，几乎所有的传统乐器的发声频率都在此之间，当然，电子合成器则另当别论了.

在可听声里，又分为乐音和噪声. 凡是其振动波形是

周期性、在频谱上是分列、听起来有一定音调的，就叫作“乐音”．反之，凡是其振动的波形不呈周期性，在频谱上是连续的，听起来没有一定音调的，则叫作“噪声”．

每一个乐音，即周期性的振动都可以分解为许多不同频率、不同相位、不同振幅的简谐振动的叠加，这叫作“富氏分析”．简单的简谐振动即正弦振动或余弦振动的传播产生的声波叫作“纯音”．实际的乐音如歌唱声、乐器声等都不是简单的纯音，而是许多纯音的叠加．在这些简谐振动中频率最低的叫作“基频”，频率是基频的整数倍的叫作“谐波”，频率不是基频整数倍的高频振动叫作“分音”．基频、谐波、分音组成了实际的乐音．基频的能量往往是最大的，但也不是绝对的．

我们所听到的音乐中，除了乐音以外，还包括一些在物理上是噪声的声音，如锣、鼓、沙锤、木鱼、梆子等没有固定音调的打击乐器，海涛、流水、风声等效果声等，这也是音乐声的一部分．

我们做过实验，把一个乐音中20k至50k赫兹的高次谐波“切掉”，与没有被“切掉”的相比，二者听起来是有明显差别的．这说明这部分高次谐波对音色的改变是有作用的．因此，也应纳入音乐声．

这样，我们的结论是，从物理上讲，音乐声应由三部分组成，即：乐音、在音乐中使用的噪声、以及对音色有影响的在谐波中存在的一部分超声．

§3 “声声慢”与“节节高”
——声的传播速度

当你在校园里的某一处听广播喇叭里播的乐曲时，如果你能同时听到两个扬声器发出的声音，有时你会听到两个声音是一先一后的. 产生这些现象的原因是你所在的位置与两个扬声器的距离不同，而且相差较大，而声音的传播是有一定速度的缘故.

我的一位朋友是歌唱演员，有一次在剧场里演出时使用扩音设备中扬声器里播放的伴奏带作为伴奏音乐. 她总是觉得自己的歌声在往后拖，于是不断地放慢速度“等”着，而结果是越拖越慢，成了“声声慢”，而砸了锅. 究其原因，是没有在舞台上放返送音箱，她听到的是台前向观众的扬声器中播出又从剧院后墙反射回来的伴奏音乐. 由于声的传播有一定速度，当然就比唱歌后拖一定时间，有个“时间差”. 你等它，“时间差”依然存在，就越拖越慢了.

先看到闪电，再听到雷声，这说明声音传播的速度比光速小，并且是可以感觉到的. 人们测定在空气中传播的声速大约是每秒钟 340 米左右，声音在液体和固体中传播的速度要比空气中的传播速度大. 人们把耳朵贴在地上，可以比站着先听到远处的马蹄声.

声音传播的速度还与传播介质的温度有关. 介质温度越高，传播速度越快. 声音随着传播介质的温度变化，这点在音乐表演中有很重要的影响. 当我们用嘴吹奏笛子、小

号等管乐器时，特别是在冬天，会由于人的气息给予的热量而使管内的空气温度升高. 这样，由于管乐器的音调与空气中的声速成正比，就会使乐器声的频率变高，成为“节节高”乐队. 或者使管乐器的声音与弦乐器等音调随着温度变化不大的乐器的声音脱节，而为对不准音的“多调乐队”，这将会造成不堪设想的后果.

§4 舞台顶上的悬板，清晨的火车声和“隔墙有耳”——声的反射、折射和绕射

同所有的波一样，声波，包括音乐声波也有反射、折射和绕射现象.

人们都有一些声音反射的经验. 天坛的回音壁是由于圆形的围墙有足够大的直径，在墙内的某处说话，声波就不断沿墙的内壁多次全反射并传播过去. 而三音石则同在两楼之间放鞭炮的道理一样. 在三音石上拍手，声音经多次反射而出现连续的几下声响.

声音的反射在音乐上有很实际的意义. 音乐厅、歌剧院舞台上的顶板、侧板都是起反射作用的. 场内四周的墙壁都具有一定的反射功能，太强了或太弱了都不大好. 人们靠天花板、侧墙和后墙的反射，才能听到反射声. 而反射声的存在是音乐厅、歌剧院以至任何房间里取得好的音乐听觉效果所不可少的. 在小的房间里唱歌，感到效果较好，是因为声波在室内反射引成共振的原因（图 2-1）.

声波在管乐器管内的反射形成声驻波，这是管乐器决

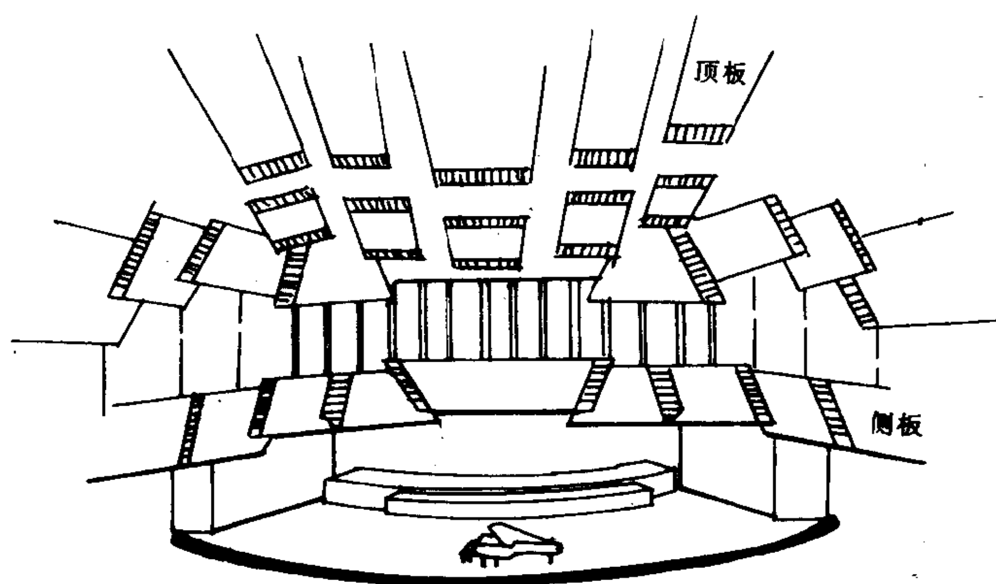
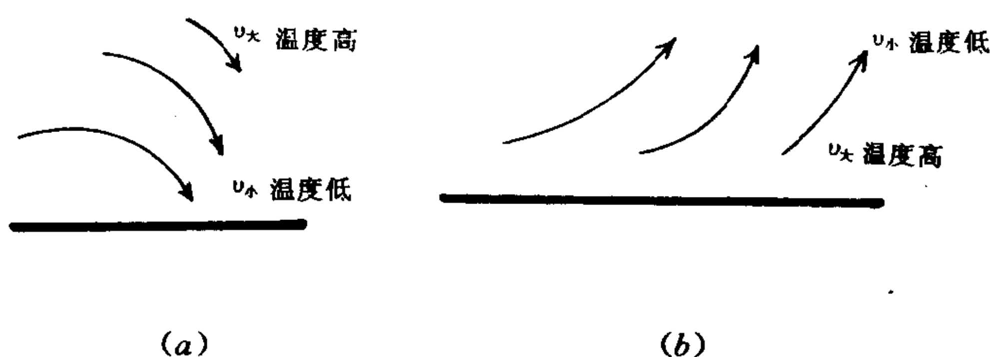


图 2-1 北京音乐厅顶板、侧板的声反射作用



(*a*)　　　　(*b*)

图 2-2 由于温度不同而造成的声音的弯曲

定音调的依据.声波在不同密度的介质里的传播速度不同.因此,由于温度不同导致介质密度不同从而造成声速不同,也会使声音在传播中的方向改变,即向传播速度小的方向弯曲. 清晨,你可以听到远处的火车声,飞机场上飞机轰鸣声,是因为地面温度低的原因,声音向地面弯曲(图 2-2 (*a*)),炎热夏天的中午,地面被晒得非常烫,于是声音向上弯曲,地面就变得寂静无声了(如图 2-2 (*b*)).

声波还可以绕过障碍物，这就是声波的绕射，也叫衍射. 其原理是波传播到任何一点，都可以把这一点看作是新的波源而发出球面波，于是，可以越墙而过——出现俗语“隔墙有耳”了（图 2-3）.

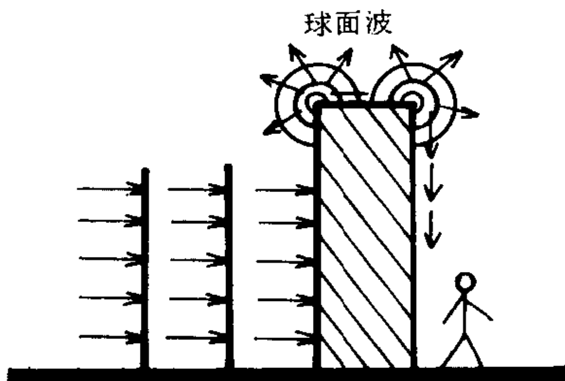


图 2-3　声的绕射

§5　为什么你能分辨出乐队中不同乐器、合唱队中不同声部的声音——声的独立传播

独立传播是波的重要特性之一.

当你在平静的水池中投入一块石子，你可以看到水波向一侧岸边传播过去，继而又反射回来，与前进的波叠合，形成水面上粼粼波形. 随之，水波又向远方传播开去，两列波的叠加并没有影响它随后的传播，这是因为水波的独立传播性能（图 2-4）.

节日的天空里，两束探照灯柱迎着焰火硝烟的迷雾来往寻索. 当它们交叉叠合在一起时，可以见到其交叉处的光有明显的增强，而后又各自向前方射去，好像刚才没有过叠合一样，这是光波的独立传播.（图 2-5）

声波也同样有独立传播的性质. 在舞台上演奏的一个管弦乐队或民族乐队或电声乐队，你可以明显地分辨出哪

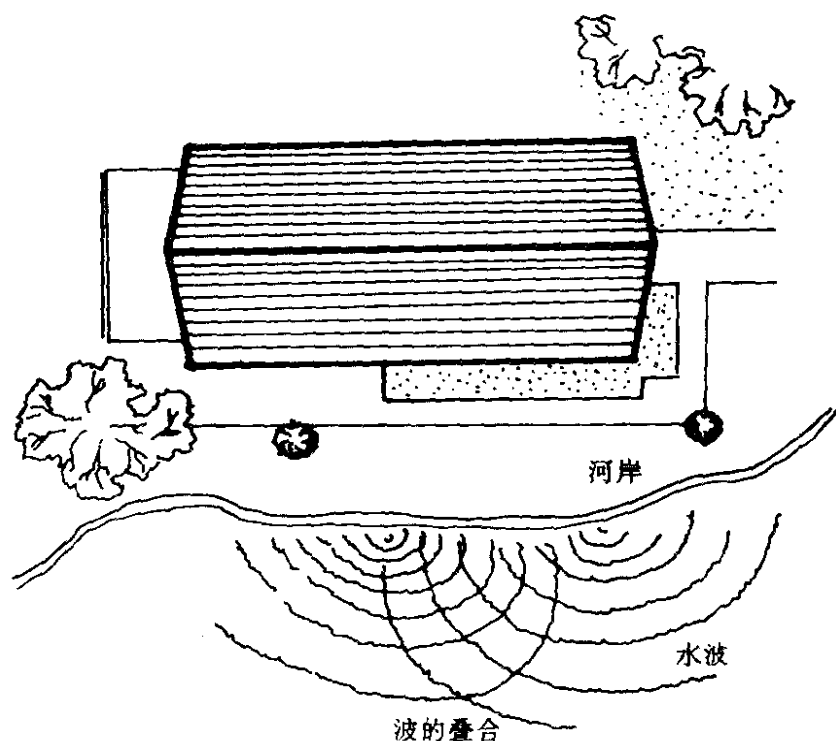


图 2-4　波的传播

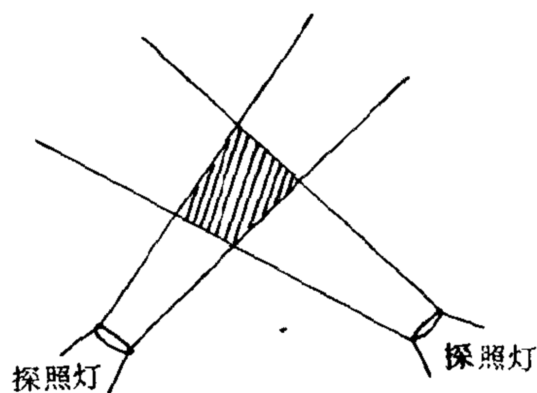


图 2-5　光的独立传播　两束探照灯光柱

是小号声，哪是小提琴的声音或长笛的声音，一一分明. 这说明许多乐器发出的声波虽然都在空间里叠合在一起，但它们还是互不干扰，独立的传入你的耳朵（图 2-6）. 合唱中能分出声部，也是这样. 一个声轨里或是一条磁带上录着许多种不同乐器发出的声波，经过重放，还是独立地传

到听者的耳中.



图 2-6　各种乐器的声音独立传入你的耳朵

在嘈杂的背景噪声中，可以听出某一个人的声音，但是，同一声部里的乐器或合唱，如许多把小提琴或许多人组成的女高音声部里，却常常分不出是谁的声音，而小提琴同长笛虽然奏同一旋律，还是分得出来的，这说明声的独立传播以及独立接收是以音色来区分的.

§6　音乐带给耳膜的振动
——声纵波、声压、分贝

我们已经知道，音乐是一种传入耳朵里的声波. 大多数情况下，是进入耳朵里的空气的振动，冲击鼓膜，使耳膜产生振动，经过传递与听神经接触，于是感受了声音.

波主要分为两类：一类是横波，一类是纵波. 介质质点或物理量的振动方向与波的传播方向相垂直的波叫作横

波，如电磁波的电磁场振动方向与传播方向垂直，是横波．介质质点或物理量的振动方向与波的传播方向相同的波叫作纵波．声波是一种纵波．纵波也叫疏密波或压缩波，好像把一根弹簧压缩以后再放开并扔出，就一张一缩的向前运动那样．图 2-7 所示，是纵波．

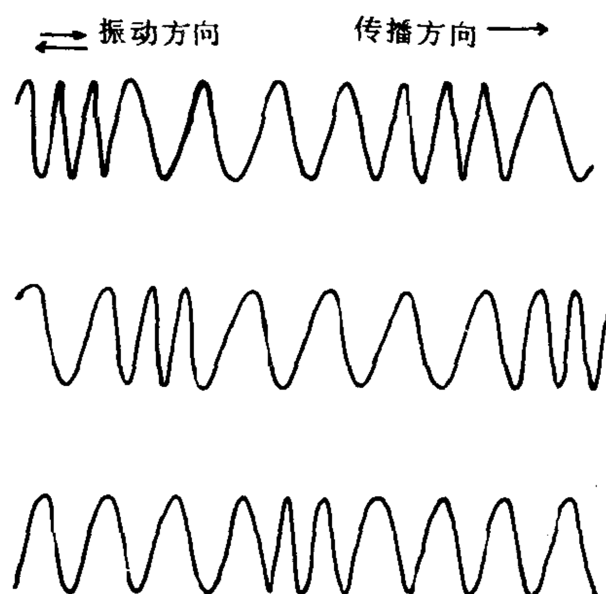


图 2-7　纵波

在空气里传播的声波把空气进行局部的压缩和舒张，也就是使空气周期性的变疏和变密，或者说是空气的压强周期性的变大和变小，比静止的大气压强增加或减小的部分叫作声压．

声压一般是很小的．举一个例子来说，在声波的频率是 1000 赫兹时，一般人的听阈下限，即刚刚能听出来的声压值是 2×10^{-5}帕，1 帕是 1 牛顿/米^2．夜深人静时屋里的声压大约是 2×10^{-3}帕．但十米以外的喷气飞机发动机的声压大约是 2×10^{2} 帕．这样大的声压，耳膜就会受不了．一个大气压是 10^{5} 帕．各种声响的声压大致如图 2-8 所示．

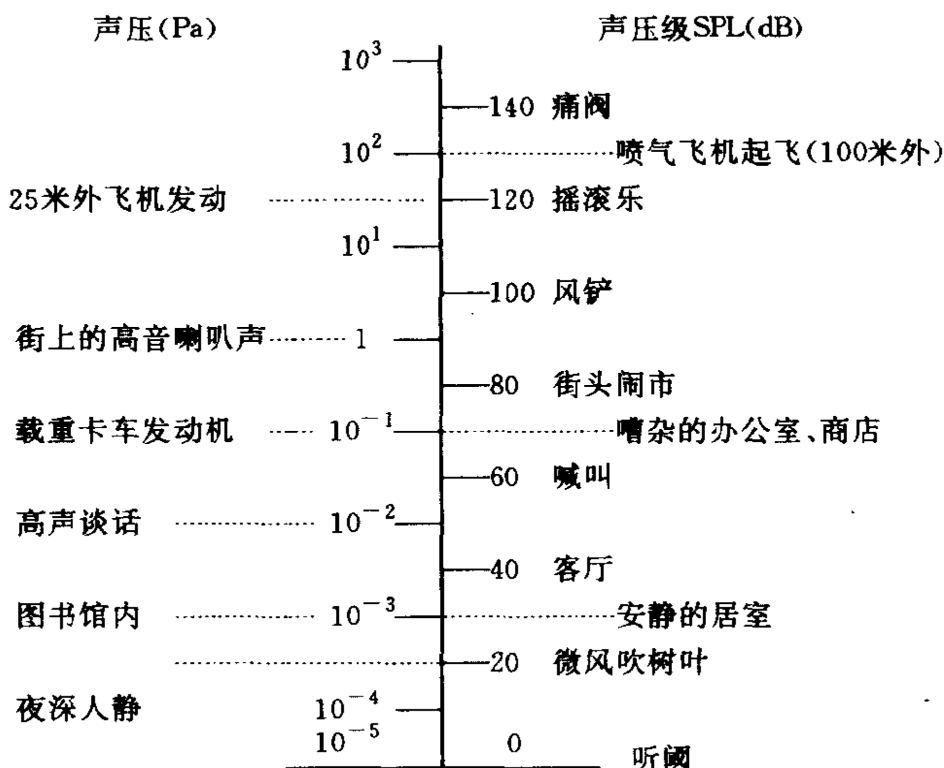


图2-8　各种声响的声压及声压级

由于实际生活中声音的强弱变化跨越了好几个数量级，于是常常采用对数值来表示．把实际声压与一个很小的参考声压（2×10^{-5}pa）的比值取常用对数值再乘以20，叫做声压级，用“分贝”（dB）作单位．夜深人静的居室内的声压级约是30分贝．街头喧哗的声压级约是80分贝．十米以外喷气发动机的声压级有140分贝，这已经要使耳膜震痛，再大的声压就要把耳膜震破了．重金属摇滚乐的声压级要达到120分贝以上，这也够大的了．长期听高声压级的音乐或长期在高噪声条件下工作，对听力是有损害的．

声压每差一个数量级，声压级差20分贝．声压的相加是分贝的相加，一万把同样的小提琴完全协调的同步演奏比一把小提琴演奏高出80分贝．

§7 手风琴上的两排中音簧
——“拍”

中型以上的键盘式手风琴的右手琴键，每一个键有两排中音簧，这两排中音簧的频率大概相差6至8个赫兹，其作用是产生“拍”频.

当两列振动方向相同，强弱差不多，但频率不同的波叠加时，会产生“和频”及“差频”. 当它们之间的频率相差很小时，差频就很明显，叫作“拍”频，这两者频率相差多少赫兹，每秒就出现多少次的拍频. 例如一个98赫兹的音与一个100赫兹的音叠加，就产生每秒2次的拍频. 人的耳朵对于以每秒6至8次的频率作颤音时，听起来是比较舒服的. 因此，键盘式手风琴上右手同一键的两个中音簧的设计频率相差6至8赫兹，就能产生较好的颤音效果. 而俄罗斯的巴扬——钮扣式手风琴的右手键盘则是单簧的，因此没有拍频造成的颤音，这是别具特色的俄罗斯民间风味.

“拍”的现象在音乐中还用得很多. 弦乐器调弦时，一根空弦与另一根弦的某一个把位应该发同样音时，你听听它们之间有没有拍频，如果没有，就调准了. 钢琴调律时，由于平均律与小整数倍频之间的微小差别，可以根据两个五度或四度或甚至三度音之间的拍频多少来确定是否调准了.

在历史上，还曾有过根据一根已知频率的管与另一管

产生的拍频数去测定另一根音管的频率的记载（图 2-9）

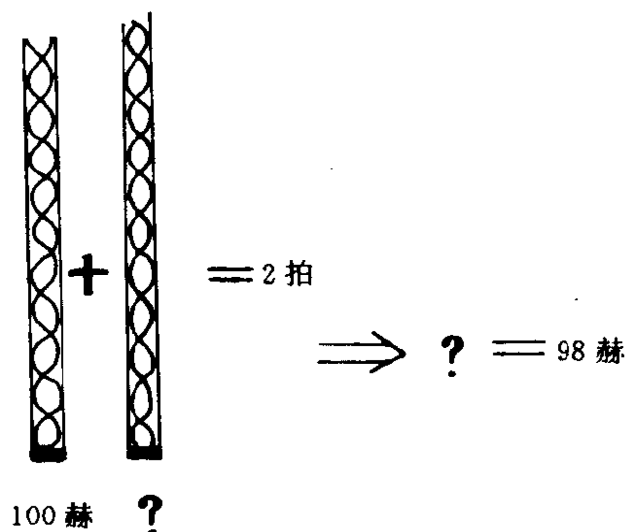


图 2-9　利用“拍”测频率

§8　曹绍夔治好磬的自鸣
——声的共振或共鸣

任何物体都有其自身的振动频率，如房屋、机器、大桥、飞机、乐器、簧片、弦线、人体等等，这叫做固有频率.

如果从外面给物体加以一定周期性的力，当这个外加的力的频率与物体的固有频率相接近时，物体的振动就会因外加的能量与其固有振动同步而大大加强，这就是共振，音乐上也称共鸣.

物体的共振有益处，也有害处. 共振筛可以用于工业选矿；核磁共振可以用来精确的测定磁场，并已在医学上有广泛的用途；无线电波的谐振可以在广阔无垠的天空中，

从无数嘈杂的电波里选出有用的频率. 但是共振也有害处，房屋的固有频率如果与地震波的频率一样，地震时就容易散架；机器如果与底座发生共振，就会剧烈地振颤；士兵的步伐频率与大桥的固有频率一样，过桥时就会使大桥坍塌.

我国唐朝有一本名叫“刘宾客佳记录”的书中，记有一则故事:洛阳某僧房中的磬经常在斋钟敲响的时候自鸣，僧人由此被吓出病来了. 他的朋友曹绍夔得知以后，用锉刀把磬锉去几个地方，于是，当钟再敲响时磬就不自鸣了，这是因为磬与钟的振动频率相同而引起的共振，而把磬磨掉一些就改变了它的固有频率，于是就与钟不产生共振了.

声学中的共振常叫作共鸣. 在乐器中，提琴、竖琴等许多弦乐器都有共鸣箱. 还有一种有共鸣弦的乐器. 钢琴有共鸣板即琴板. 有的乐器靠共鸣才听得见声. 有的乐器靠共鸣来改善音色. 唱歌有共鸣区、共鸣点. 好的提琴的琴箱在许多频率上都能引起共鸣，即有比较强和宽的共振峰. 经过训练的嗓子唱起歌来有较多和较强的共振峰，从而比扯着嗓子叫来得动听.

第三章
音乐的构成

§1 表示音乐的物理量——振动频率、振动幅度、时间、位相、声波的谱

归根结蒂，音乐是一种声音，而声音又是一种在介质中传播的机械波. 而波，即传播的振动，有四个要素：振动频率或周期，振动的振幅或强度，振动延续的时间即时值，以及波的位相. 因此，表示音乐的物理量从根本上也只能是这些了.

具体说来，我们在音乐中习惯用周期的倒数频率而不用周期，习惯用与振幅的平方成比例的声强而不用振幅，时间则用时值这个词. 至于声波的相位问题，历史上曾经有个声学中的“欧姆定律”，认为声波的相位是不起作用的. 但是，目前的实践和理论表明，声波的位相问题是现实存在的. 除了以上这几个原始的物理量以外，我们还常用声谱来表示音乐声. “谱”本来就是某个事物按某种程序排列起来的意思. 如年谱就是把一个人的活动按时间年代排列起来，棋谱就是把下棋的走步列位按时间先后排列起来. 于是，我们把表示声音的物理量排列起来，就有以下一些常

用的声谱：

音乐的波形是声振幅按时间先后的排列.波形不同,声音就不同，我们常常用制造不同波形来改变声音(图 3-1).

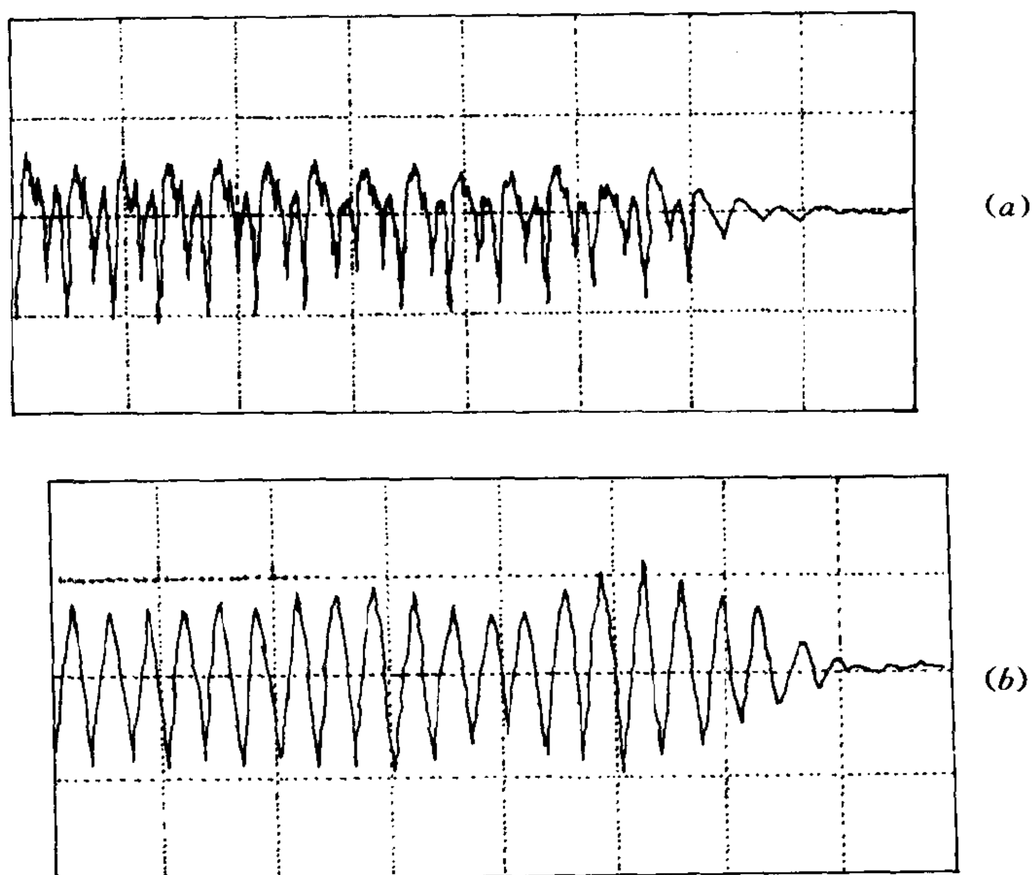


图 3-1 声音的波形 (a) 吉他 (b) 人声

由声级记录仪记录下来的声级图，是表示声波强度的声压级随时间的变化（图 3-2).

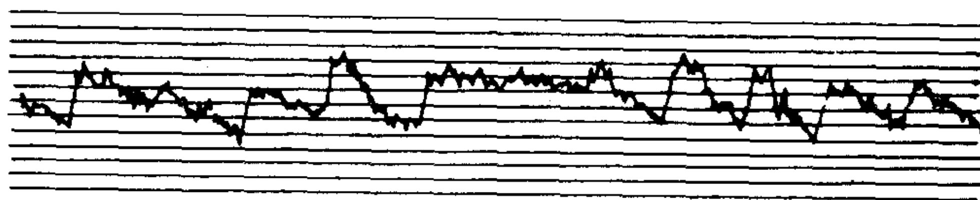


图 3-2 声级图，记录的是贝多芬月光奏鸣曲的几小节

声压（或声压级）或声功率或声强按频率的分布就是频谱．频谱有分列谱和连续谱．频谱图上的包络线的极大值就是共振峰．迄今为止，频谱仍是研究声音的主要手段之一．（图 3-3）

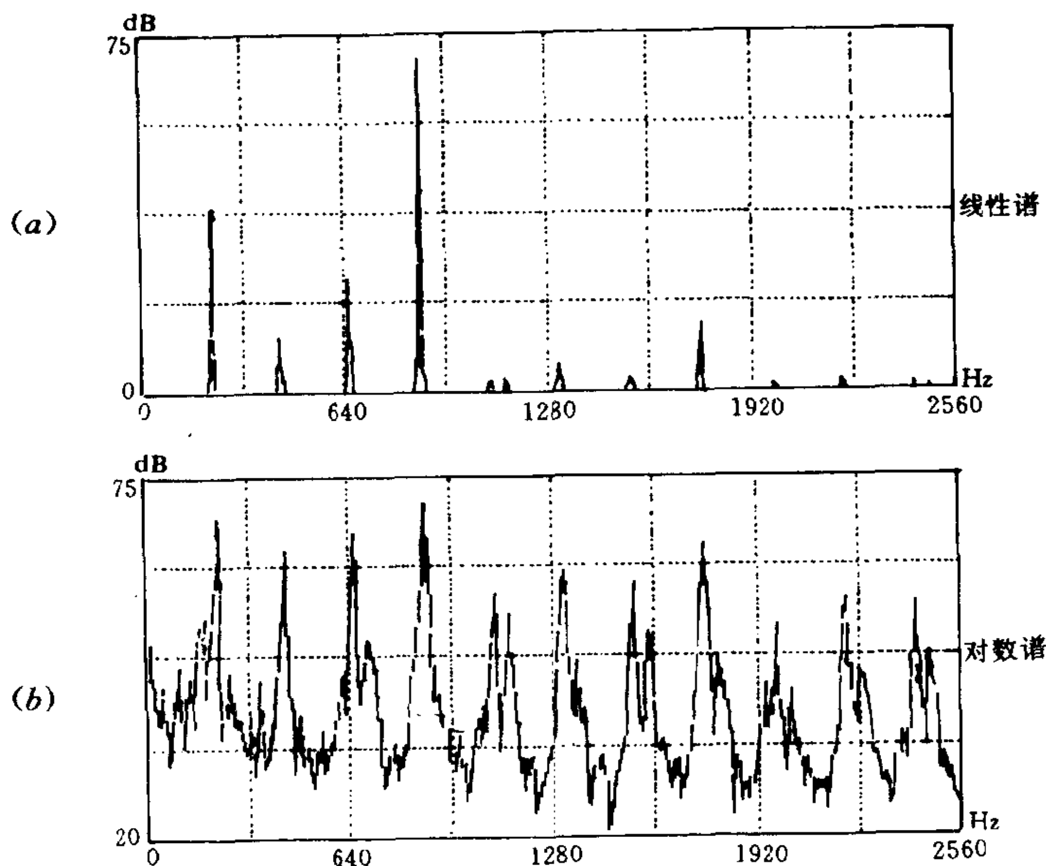


图 3-3　声音的频谱，(a) 是线性谱，(b) 是对数谱．

可以把声音强弱即声压或声强，频率和时间同时显示出来，叫作三维语声图，如图 3-4．这张平面图上的纵轴是频率，横轴是时间而深浅则表示强度，这种三维声图叫“语声图”，是因为它首先是在研究语言声学时用的．

这张用计算机画出来的像高高低低呈丘陵状的立体图也是三维声图（图 3-5）．平面上的两个轴是频率和时间，山包的高度是声强，山峰处即共振峰．这些峰表示共振峰随

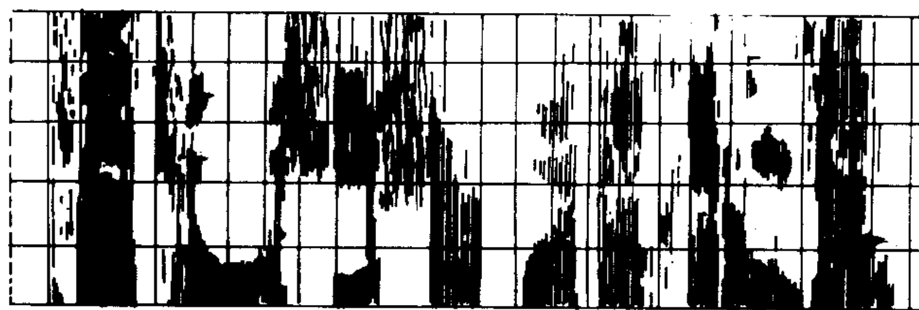


图 3-4　三维语声图

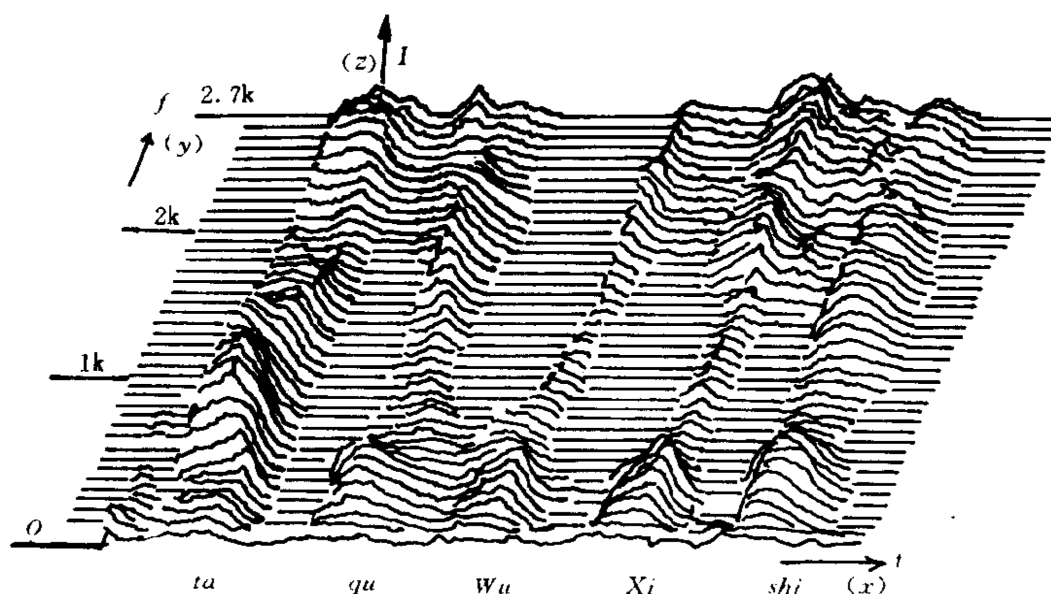


图 3-5　计算机画出的三维声图

时间而变化．把这张图“切”开，在 $I—f$ 面上就是频谱，$I—t$ 面上就是某一频率的声音强度的时间变化，$f—t$ 图即频率与时间的关系．

利用现代技术，我们还可以用激光全息的方法把产生声音的振动模式记录下来．还有，干脆用机械的、磁的、光的技术把声音全部记录并贮存起来．图 3-6 是用激光全息技术记录下来的小提琴的振动模式．

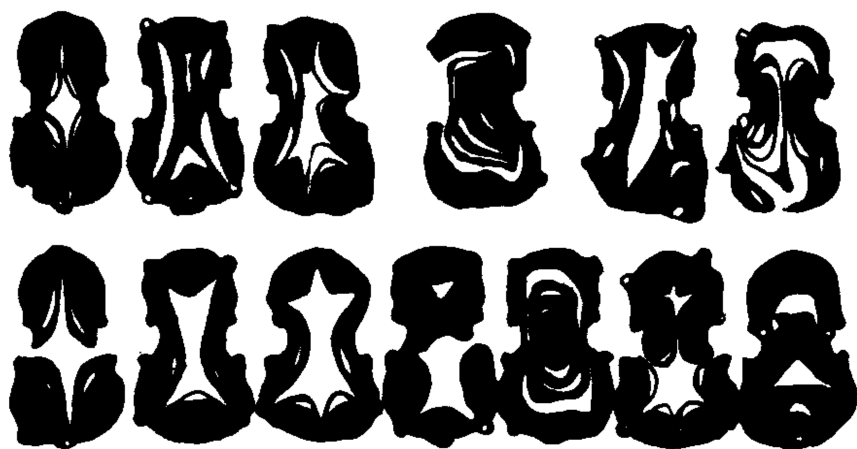


图 3-6 用激光全息技术记录的小提琴振动模式

§2 音乐的主观量
——音调、响度、音色和时值

我们已经介绍过作为声波一种的音乐及其客观物理量. 但是音乐终究是一种艺术，是一种人们的审美感受. 不管是作曲家、演奏家、指挥家或歌唱家以及欣赏音乐的听众，每个人都有自己的情感、思想和审美标准. 一首乐曲，一首歌曲或一部音乐作品，都要通过有主观感觉的人的创作或表演，才能给欣赏者以艺术的享受. 那么，这些表示音乐的客观量又是如何在人的感觉上得以体现呢？有哪些可以表达音乐的主观量？客观与主观之间又如何联系，有什么差别呢？

历史上，声学的奠基人之一、德国物理学家亥姆霍兹就曾提出过，音调、响度和音色是音乐的三个主观量，在许多地方一直沿用至今. 当然，其内涵是在不断发展的.

音有一定高低. 唱歌有高音、低音之分，小提琴的声

音比大提琴高，女人的声音比男人高．所以音调是一个主观量．一般来说，发声体的振动频率越高，人们听起来音调也越高；发声体的振动频率越低，人们听起音调就越低．音调（pitch）* 也曾称作音高．

音乐上用音名来表示音调，即用 C、D、E、F、G、A、B 及升、降号来表示．如果表示不同的八度还有小字一组即 c^1—b^1，小字二组即 c^2—b^2，此外还有小字组，大字组……等等．正对着钢琴钥匙孔的中间的一组音的音名是小字一组即 c^1、d^1、e^1、f^1、g^1、a^1、b^1．中国的黄钟、大吕、太簇、应钟……等是音名，同时也是律名．

凡是要合奏、合唱或制造可以同别的乐器合奏的乐器，都必须有一个共同的音调（高）标准，不然就合不到一起．

现在把 a^1 的频率定为 440 赫兹，叫作国际标准音调，这是在 1934 年定下来的，称为第一国际音调．又在 1939 年重新确认．有些国家每天的广播中都播出这个标准音调．还有把 $c^1=256$ 赫兹作为标准音调的，这叫作物理音调，目前已不多用．各指挥家或演奏家也可以自己确定音调标准，如有的钢琴演奏家愿意把 a^1 定得高一些，如 $a^1=444.00$ 赫，这样，整个琴的音就更明亮了．

频率与音调并不是严格按比例对应的．一般认为，频率每增高为 2 倍，音调听起来高一个八度．这仅仅在中频段里是这样．在高音部分，听感偏低，即频率增加一倍，听起来不到高八度而偏低．于是，要把频率调高一些，以适应人的耳朵．低音段则听感偏高，于是需要把频率调低一

* pitch 的中文译名为音调或音高．

些，这偏高和偏低在钢琴上最大会达到30至40“音分”．钢琴上每相隔“半音”，相邻两键按等比分为100音分．音调有个单位叫“美”，在音乐界一般不大熟悉也不大去用．

乐音听起来有一定的强弱，即音的响度，这是乐音的第二个主观量．音的能量越高，声强越大，听起来响度就越大．但是这两者也不是按比例一一对应的．例如，对于低音，同样的声强，听起来响度比较低，而在某个频率处，如3k赫兹附近，同样的响度声强最小，即这地方的听觉最灵敏．响度有个专门的单位叫“宋”，在音乐界是不被常用的．

至于音色，那更是一种主观感觉了．从传统来讲，决定音色的因素主要是频谱，所以常常根据频谱模仿各种音色．但是实践表明，音的起始和结尾时的瞬态情况，即“音头”和“音尾”，也同音色很有关系．例如，如果你把音头截掉，那就很难分辨出长笛还是小提琴．又如你把录音磁带倒过来放，当然频谱不会改变，但音色不同．音色不仅与频谱的组成，即基频、谐波和分音的数目、长短、相对强度，分音的不协和程度及瞬态有关，还与基频和谐波在听音区的位置有关，这是由于人耳对于各种频率的响度反应不同．音色也与听者距声源的距离有关，这是因为一个音中的各种成分的衰减不同．而且音色感与年龄、职业、本人的经历等有关．对于音色的客观基础是什么这一课题，一直被人们所研究．

综上所述，可以把音乐归结为四要素：即音调、响度、音色和时值．

§3 和弦的协和性

——音程、频率比、音分、调式、和弦

在钢琴上，音调每相差“八度”，在其间按等比等分成十二份，即十二个“半音”．每两个半音（“小二度”）构成一个“全音”即“大二度”．一个“全音”加上一个“半音”叫作“小三度”．两个全音构成“大三度”．然后又有两个全音加上一个“半音”成为“纯四度”．三个“全音”是“增四度”．再加上一个“半音”成“纯五度”．逐步加上去，有“小六度”，“大六度”，“小七度”，“大七度”以至十二个“半音”或六个“全音”即成“八度”了．这些“度”，“全音”，“半音”都表示音调间不同的距离，就是“音程”．

前面讲过，音调与频率基本上有一一对应的比例关系，因此音程还可以用“频率比”来表示．

对于听觉或音乐实验、理论分析以及乐器制作来说，如果音程间每个台阶是“半音”，就嫌太大了．于是把钢琴上的“半音”等比地等分为100份，每一份是一个“音分”，这也是一种“音程”．

“音程”在音乐上是一个非常重要的基础知识．音调按不同音程关系由低至高顺序排列，就构成不同“调式”的音阶．音阶由七个声音构成的叫做七声音阶，由五个音构成的叫做五声音阶．在钢琴上任意取一个音为调式主音，称作为“第一音”．其高八度音也是调式主音，是七声音阶的

第八音．如果七声音阶中第三、第四音和第七、第八音之间是半音，其余第一、二，第二、三音，第四、五音，第五、六音和第六、七音之间都是全音，则听起来自然是*dol*、*rei*、*mi*、*fa*、*sol*、*la*、*te*、*dol*（高八度）．用简谱写是1、2、3、4、5、6、7、1̇（图3-7），即为自然大调式的音阶即自然大音阶．



图3-7 自然大调式各音间的音程关系

如果从调式主音开始，七声音阶中第二、三音和第五、六音之间是半音，其余各音之间即第一、二，第三、四，第四、五，第六、七，第七、八音之间都是全音，则听起来就是*la*、*te*、*dol*、*rei*、*mi*、*fa*、*sol*、*la*（高八度），用简谱写是6̣、7̣、1、2、3、4、5、6（图3-8），即为自然小调式的音阶即自然小音阶．



图3-8 自然小调式各音间的音程关系

和声小调式也是一种常用的调式，它仅仅是在自然小调式的音阶中把第七音升高半音，听起来是*la*、*te*、*dol*、*rei*、*mi*、*fa*、*se*、*la*（高八度），简谱是6̣、7̣、1、2、3、4、#5、

6，如图 3-9 所示.

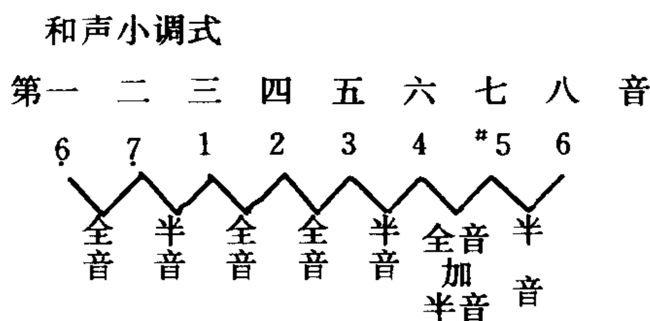


图 3-9 和声小调式各音间的音程关系

此外，还有旋律小调式等各有不同音程排列.

从音乐上讲，两个以上的音同时发声就有了和声效果，由此出发，发展了和声学，和声学中最基础的理论是和弦理论，即三个或三个以上的音按三度叠置就构成“和弦”.

按前所述，音程可以用“度”或“频率比”或“音分”来表示，因此，多少度音程就有相应的频率比或音分值. 和弦中几个音的关系也有一定的频率比.

所谓“大三和弦”是一个“大三度”再叠置一个“小三度”，听起来是“*dol*、*mi*、*sol*”（“1 ‘、3、5”）或“*fa*、*la*、*dol*（高八度）”（“4、6、$\dot{1}$”）或“*sol*、*te*、*rei*（高八度）”（“5、7、$\dot{2}$”）等，而小三和弦则是一个“小三度”再叠置一个“大三度”，即听起来是“*la*（低）*dol*、*mi*”（“$\underset{\cdot}{6}$、1、3”）或“*rei*、*fa*、*la*”“2、4、6”或“*mi*、*sol*、*te*”（“3、5、7”）等.

对比“大三和弦”和“小三和弦”的听感，我们总是觉得大三和弦更和谐些，这是因为大三和弦的三个音的频率比为 4∶5∶6，要比小三和弦的三个频率比 10∶12∶15 更接近小整数比（不同律制有些小差别，我们在以后还要讲到）. 凡是两个音或几个音的频率比越小，那它们在一起

发声就越谐和，这可以解释为它们的谐波有更多的重合的地方．例如一个基频为 $f_1:f_2:f_3=400:500:600$ 赫的大三和弦，f_1 的三次谐波（$400\times3=1200$ 赫）与 f_3 的二次谐波（$600\times2=1200$ 赫）重合，f_1 的五次谐波（$400\times5=2000$ 赫）、与 f_2 的四次谐波（$500\times4=2000$ 赫）重合．对于小三和弦就比较差些，即如果一个小三和弦基频比是 $f_1:f_2:f_3=400:480:600$ 赫兹，那么谐波的第一次重合是 f_1 的六次谐波（$400\times6=2400$ 赫）与 f_2 的五次谐波（$480\times5=2400$ 赫）与 f_3 的四次谐波（$600\times4=2400$ 赫），图 3-10 是大三和弦谐波的频谱．

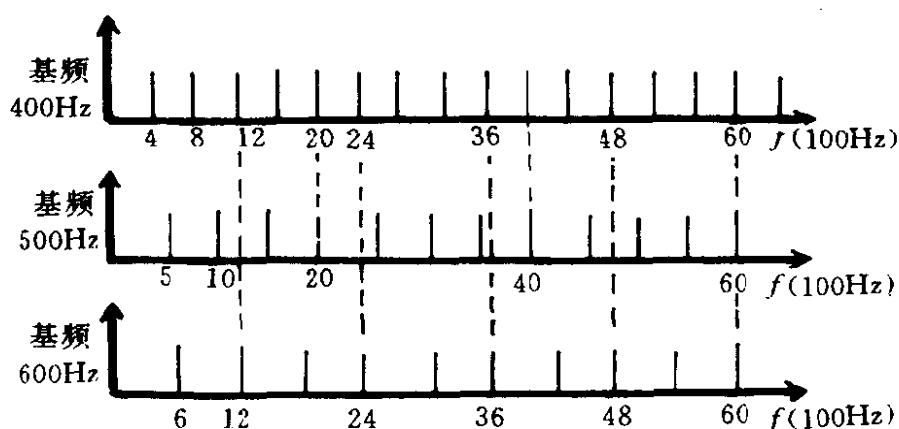


图 3-10　大三和弦谐波重叠的情况

从音程看也是如此，在“纯律”的情况下，八度音程的两个音的频率比是 1：2，五度是 2：3，四度是 3：4，大三度是 4：5，小三度是 5：6 或 27：32，大二度是 8：9 或 9：10，小二度是 15：16 或 24：25，频率比越来越大，协和程度就越来越差．

§4 “平均律”、“五度相生律”和“纯律”——生律方法与频率（音调）的关系

把两个相差八度音程之间的音顺序排列，就成为音阶.前已讲过，在一个八度之内有五个音的就叫五声音阶，有七个音的就是七声音阶.把一个八度音程分成十二个音，就是半音阶. 常见的就是这几种音阶.

从一个音出发，如何“生”出音阶中各个音，有不同的“生律”方法. 不同的生律方法也就是不同的“律制”.用不同律制构成音阶，就形成不同的“音律”. 这都是有严格的数学方法的. 音律中的每一个音也叫“律”. 我们在这里仅简略地讲一下.

音阶中的各个音都有音名，由于生律方法不同，不同律制生成音律中的同名音. 例如都是c^1，其频率是不一样的.不同律制下的各律之间的音程或频率比也是不一样的，于是就成了各种音律理论. 现在我们就从物理内容上来看看音律学.

最常用的三种律制是“十二平均律”、“五度相生律”和“纯律”.

当前的钢琴和所有键盘乐器用的都是“十二平均律”，就是把一对八度音，即频率比为1∶2的两个音之间按频率等比分为十二个“半音”. 后一个音的频率是前一音的$\sqrt[12]{2}=1.05946$倍，由$a^1=440.00$赫兹出发，有$c^1=261.63$赫兹. 十二平均律是我国明代科学家朱载堉首先发明的，比

西欧早了几十年.

十二平均律有许多优点，它易于转调，简化了不同调的升、降半音之间的关系，即对所有调都有 $^{\#}c={}^{b}d$, $^{\#}d={}^{b}e$ 等. 带“品”的弦乐器也是用的十二平均律. 十二平均律是当前最普遍流行的律制，钢琴家巴赫很推崇十二平均律，他写下了大、小调各两套十二平均律钢琴曲 48 首. 虽然，十二平均律没有纯律或五度相生律那样“纯”. 但一般人们的耳朵也已适应了十二平均律. 除十二平均律外，还可以有五平均律，六平均律，十四平均律等等.

如果从一个调式主音开始，不断地用三倍频（上生五度）或 1/3 倍频（下生五度）得出的音律就叫“五度相生律”. 这是一种最古老的、也是与自然最相匹配的律制，即把弦线或管长加上或减少三分之一生成下一律. 五度相生律现在已较少使用，在弦乐器的独奏中有时还用到.

如果采用三倍频（包括 1/3 倍频）和五倍频（包括 1/5 倍频）生律，就成为纯律. 纯律的各音之间有最小的整数比关系，而十二平均律和五度相生律有时就会差一点点. 因此，人们听起来纯律最为“纯净”、“和谐”. 纯律主要在无伴奏合唱中使用，中国的古琴也有人说是用的纯律. 图3-11是各种律制的大致应用情况.

三种律制是基于不同的频律比关系而生成的，有的同一音名的音频率相差很大，有的相差小些，还与采用什么调有关. 各个时期的各个国家和地区在同一律制下还会有不同的生律顺序，结果也必然是不同的.

当遇到几种律制混用的时候，就会出现“打架”的情况. 究竟“律”学的理论要细分到什么情况呢? 还必须与

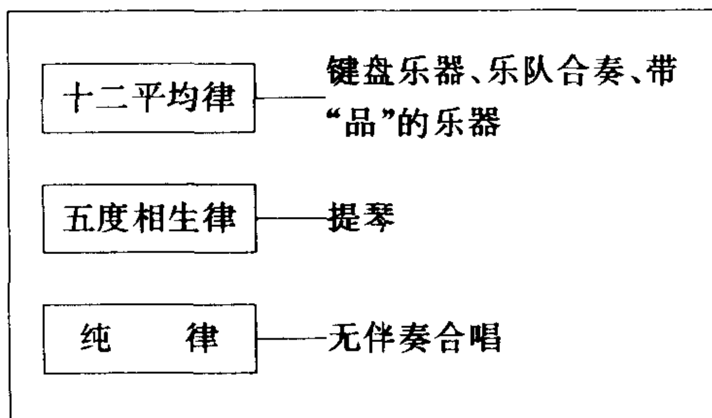


图3-11　几种律制的应用情况

人的耳朵能在各种情况下把音调差分辨到什么程度联系起来考虑.

音律学在音乐理论中对有些人来说往往是令人头疼的数学问题，而从物理上区别其生律方法的不同，就很简单了.

§5　音乐树
——音乐的时空关系

现在我们把音乐从三个基本要素：音调（频率）、响度（声强）和时值或再加上一个音色（频谱）出发，来看整个音乐世界的构成. 整体说来，音乐就是不同音调、响度、时值和音色的音在时间和空间域中的运动.

让我们来画一株音乐树（图 3-12)，它有三个主枝杈，在音调这一枝上：音程、音阶、和声、和弦、和弦外音、调式以及音律学，都是各音的音调之间的关系：音程是音调之间的距离，音阶是音调按顺序的排列，和声与和弦是音调不同的音的叠合，和弦外音是音调不在和弦结构内的音，

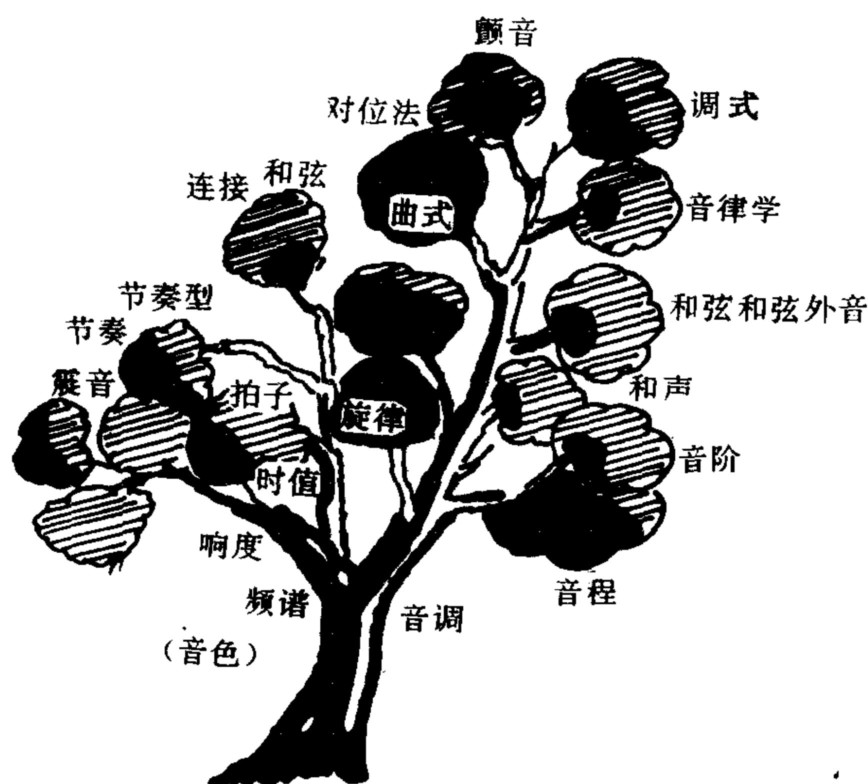


图 3-12 音乐树

调式是表示一个八度音程内的各个音的音程关系，音律学是研究一个八度音程之内确定各个音的音调的方法和各音间的音调关系.

音调与时间的关系可以组成以下的内容：旋律，包括"动机"、乐节、乐句、乐段以至整个曲调，都是音调随时间的运动. 五线谱实际上是一个音调——时间谱. 旋律音型、颤音、曲式、单音色的演奏、演唱等也都是音调随时间的运动. 对位法，和弦的连接，则是多重音调随时间的变化及其织体. 实际上音阶和调式是在一定时间过程中体现出来的，因此，也隐含着音调随时间变化的因素.

响度与时间构成拍子、节奏、节奏型、震音等，打击乐的乐谱实际上是音的强度-时间谱.

频率与声强则构成频谱.

更多的情况是几种要素的同时作用. 合唱、合奏、有伴奏的演唱是音色、响度、旋律、时值等都随时间的变化. 配器法、作曲法是研究这些组合的方法，而总谱则体现出这些因素间的综合的关系.

可以预见，音色随音调的变化，音色随响度的变化，音色随时间的变化等等，都可以组合且肯定存在相对应的关系，这里的许多规律还有待我们去探索.

§6 音乐作品的风格
——构成不同风格特点的因素

我们知道，不论是自然科学还是社会科学，也不论是技术科学还是各门艺术，在其各个层次上，都有不同的"要素"，构成每种学科的各个不同深度和广度的内容.

一部音乐作品从创作到演出的每一个环节里都渗透着人的思想和感情. 音乐作品是有个性、有风格的. "风格"就是一件事物区别于另一件事物的个性特点. 归根结底，风格是一种主观感觉，但它也是由不同的要素所构成，由一些客观基础升华而形成的. 音乐是一门主客观结合的艺术，下面我们就来讨论一下构成音乐作品不同风格的各个因素即其客观基础.

1. 拍子　华尔兹是三拍子，进行曲是两拍子，爵士音乐多用切分拍子. 有时一首曲子改变一下拍子，风格就变了. 如"友谊地久天长"原是4/4拍子，在电影"魂断蓝

桥”中改成三拍子，味道就不一样了.

2. 节奏　各民族、各地区、各时代的音乐有其不同的节奏特点. 如华尔兹第一拍重，第二、三拍轻，而约翰·斯特劳斯的圆舞曲则第二拍还略微长些. 一听中国腰鼓的节奏就与朝鲜的长鼓有显著的区别. 摇滚乐则是第二拍重.

3. 调式　中国陕北“信天游”的“徵”调式与内蒙牧歌的“羽”调式是不会混淆的. 日本“樱花”的五声音阶调式是“*mi*、*fa*、*la*、*te*、*dol*”(3、4、6、7、$\dot{1}$)，不会与中国汉族的五声调式相混淆.

4. 旋律　我国蒙族音乐中大跳后不“回头”，而是连续进行，如| $\underline{2\ 3}$　$\underline{5\ \dot{1}}$ | $\underset{\cdot}{6}$　— |等，虽然违背了旋律学的“规矩”，但却有浓厚的“草原味”. 布鲁斯的大调音阶中降第三音(^{b}*mi*)和第五音 (^{b}*sol*)、第七音 (^{b}*te*)、使人一听就区别于别的音乐.

5. 和弦　我国西南地区彝族、哈尼族多在主和弦(*do*、*mi*、*sol*) 中形成曲调. 俄罗斯民歌多用和声小调式中的五级和弦等.

6. 速度　进行曲的速度不能太慢. 迪斯科的标准拍子是每分钟 126 拍. 有时一首曲子改变了速度，风格就不一样. 如原苏联的“祖国进行曲”，男低音独唱可以慢唱，则舒展、宽广、满怀深情；而用童声合唱快唱则热烈、奔放、充满朝气.

7. 声强　如重金属摇滚乐“标准”的声强要有 120 分贝以上.

8. 乐队组织　电子音乐由合成器或电子琴、电吉他、电贝司、架子鼓等组成. 爵士乐队则少不了萨克管和小号

或钢琴，俄罗斯民间乐队则以曼陀林等弹拨乐器加手风琴为主. 中国民乐队有唢呐、笛子、板胡. 昆曲以曲笛为主，京剧有京胡、京二胡、月琴三大件加板鼓等. 各地区、各民族的民间乐器组成的民族民间乐队常常是生活气息的集中表现.

9. 伴唱形式　号子、船歌等是一人领众人和，如中国的川江号子、印尼的“星星索”等.

10. 嗓音使用　西洋歌剧里的女高音有花腔、抒情、戏剧之别. 中国京剧里的小生用小嗓，花旦、青衣用假嗓，花脸用大嗓，老生、老旦则用本嗓等. 还有许多不同剧种，都是用的不同嗓音. 单就假嗓一项，我国就不下几十种用法.

11. 过门、填头形式或音乐的织体如中国评剧的填句都落在唱句的最后音上等等.

12. 演唱、演奏、指挥风格这是不言而喻的，每个人或者每个时期都会不同.

由以上诸多特点，可能还有别的，构成了一定体裁的音乐. 如爵士是十二音调式无调性或弱调性，切分节奏，以萨克管、小号、钢琴等轮流作为主奏乐器，即兴演奏. 迪斯科是 2/4 拍子，标准速度是每分钟 125 拍，常常反复重复同一个旋律，电子乐队伴奏，强节奏，弱结尾等. 台湾校园歌曲则是民族调式，通俗歌谣体，乡土气息，富于人情味. 理查德·克莱特曼的钢琴演奏则是旋律性较强的小曲为多；旋律的拍子较自由，常有拖后一点点似流行歌曲的唱法，切分又如爵士的表现，有时加“小花”；左手伴奏常用所谓“克莱特曼十度”；不少用“变奏”，相对来说技术难度不是很大，因此通俗易懂，富于生活气息和人情味，

人称“情调钢琴”；配以管弦乐及电子乐队伴奏，效果更为突出．读者不妨去试试，去概括你所熟悉或喜欢的某种音乐或戏曲体裁的风格特点，这对你提高音乐欣赏能力将是会大有好处的．

我们把形成风格特点的因素画成一个图（图 3-13），如果前面是一棵音乐树的话，则这就是一朵“风格花”吧！

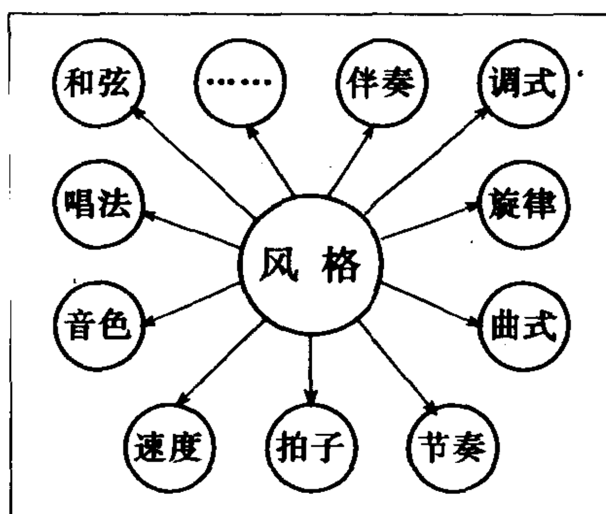


图3-13 “风格花”

第四章
乐器物理

§1 色彩纷呈的世界
——形形色色的乐器

如果不把一些自然音响如流水声、清晨的鸟啼声、秋夜的虫鸣声等在特定的情况下也算成音乐的话，那么，自古以来，音乐就分成两大类，即人的歌唱和乐器的发声. 而在这两类音乐中，无论从音域的广阔，音色的丰富，强弱的变化，声部的多少等方面，乐器都是大大地超过人声的.

人们在各种场合都要使用乐器. 古时人们在欢庆狩猎胜利时要敲击石块，即所谓“击石拊石，百兽率舞”，这里的“石”就是原始的磬，并且要弹起弓弦，因此，弓又同时是音乐的标志. 在各种正式的典礼场合如帝王登基、祭天地、祀祖宗都要奏乐. “乐”是“六礼”之一，行军打仗要奏乐，古今中外的军队里都有乐队编制. 婚丧喜庆要奏乐，吹鼓手一直是一种行业. 琴棋书画是中国古代文人雅士情趣所在. 中世纪以来，外国上层人士的社交场合中往往要演奏钢琴或其它乐器. 现时宾馆大厅里都少不了放一台高级的三角钢琴，并有乐手不停地演奏……各种娱乐场

合，那就更要奏乐了.

世界上，各个民族、各个地区的传统文化中，都少不了有乐器这一门类. 我国苗族的芦笙，维吾尔族的热瓦甫，哈萨克族的冬不拉，僮族的铜鼓，蒙族的马头琴，彝族的葫芦笙等等，都是带有特色的乐器. 外国的如朝鲜的长鼓，印尼的“杭格拉”，俄罗斯的巴扬，罗马尼亚的排箫，苏格兰的风笛，非洲、拉丁美洲……都有具备鲜明民族或地区特色的乐器.

有很小的乐器，也有很大的乐器. 最简单的乐器，也是最小的乐器，是一截芦苇或一片竹叶，放在嘴里就可以吹出美妙的旋律. 最复杂的乐器也是最大的乐器是像一整幢房屋的大型管风琴. 它可以改变几千种音色，同时发出几十个音，而电子合成器则可以说是内部微结构最复杂的乐器. 同样是个管乐器，藏族人举行宗教仪式时的大喇叭长达 4.5 米，而“管子”则可以小到放在嘴里玩弄自如.

乐器的音色也是千差万别的. 二胡可以奏得如诉如泣，马头琴则深沉浑厚，小号嘹亮挺拔，大提琴稳重舒展，小提琴柔和纤细，双簧管甜美圆润，大号粗犷洪亮，长笛含蓄清新，洞箫则低沉、飘逸…….

各种乐器的个性也各不相同，有的合群，可以与各种乐器合奏；有的则太“个别”，显得“鹤立鸡群”，只能“以我为中心”.

这些乐器色彩纷呈、千差万别、形形色色、争奇斗艳，形成了一个奇妙的乐器王国.

§2 是乐器还是仪器
——乐器中的物理

我国著名的物理学史专家吴南薰先生在30年代曾经有过一个精辟的论点：历史上第一件乐器，即在兽骨上打一个孔，成为一支人工制造的笛子，这也是历史上第一件物理仪器．对于这一观点，至今还很难举出反对它的理由．

乐器就是发出音乐声的机器．因此，任何一种乐器实际上也就是一种声学仪器．下面让我们进一步对乐器的结构进行具体的剖析．

首先，一个乐器必然有声源，即振动源．弦乐器的振动源是振动的弦线．管乐器的振动源可以是振动的簧片，如单簧管，可以是嘴唇的振动，如铜管乐器，也可以是边棱形成的气流振动，如笛子．簧振乐器的振源是簧片的振动，鼓的振源是一个圆膜，钟的振源是整个钟体，电子乐器的振源可以是石英振荡器或是振荡电路．振源是任何乐器必不可少的．

乐器都有发声体．有的乐器的振源就是发声体，如鼓皮、钟体、口琴或手风琴的簧片等．管乐器是靠管来决定音调的．空气在管内形成驻波，通过管口把声音传播出去而发声．有的簧管乐器是由簧和管共同决定音调、在管口处发声的．

不少乐器的发声体还包括了共鸣体，如提琴的弦线振动发出一定音调的音，但声音很小，几乎听不出来．通过

琴马、音柱把振动传到琴箱的上下音板，使弦线与琴箱产生共鸣，才能发出我们现在所听到的提琴的声音.

有些乐器还有附件,如大提琴的支杆是一种支持体,还如柳琴的拨子、风琴的风箱、提琴的指板、琴马等. 这也同仪器一样，要有个支腿、配件等.

乐器作为一种声学仪器，除了本身结构以外，其发声原理、声驻波的形成、声频的合成、声波的传播、电子乐器的调制和控制、数字音源的制作、线路或结构设计等都是物理内容.

乐器的分类要以其发声的物理机制为依据. 制作乐器材料的性能，如湿度、硬度、弹性模量、密度、声波在材料中的传播速度、材料的阻尼性质、声阻抗等，都是物理属性. 材料的处理，如人工老化、加湿、烘烤、上保护层等，都是物理方法，用的是物理测量仪器. 许多研究乐器的方法如频谱分析、波形观察、激光全息、声电模拟等等都是物理方法. 乐器的保存和维护如保持一定温度、湿度等，都是物理环境.

因此，物理学是乐器学的基础. 当然，还要加上人的演奏以及音乐学、美学、心理学以及工艺等，才是乐器学的全部.

§3 对一件好乐器的要求
——乐器的主要声学参数

除了外表美观以外，乐器演奏家常常以“得心应手”这

个词来形容他心爱的乐器．那么，让我们先来剖析一下“得心应手”到底包含有哪些内容？依笔者看来，主要有：乐器的音准是好的，性能是稳定的，音色是优美的，表现力是强的，特别重要的是可以随心地控制．下面从声学的角度，让我们再来看一看这些都体现在哪些声学参数上！

乐器要有宽的音域．有些乐器的音域是固定的，如钢琴．有些乐器的音域是可以改变的，如提琴音域的上限有一定范围变化的余地．有些乐器的音域实际上是可以改变的，如手风琴的变音器可以上、下改变一个八度等．当然，我们希望乐器有一个较大的音域．

音准好是乐器的起码条件．有些乐器的音准是可以调整的，如钢琴．这样，音准的好坏有赖于调琴师和演奏者的耳朵．有些乐器的音准是不能随便调整的，如普通竹笛的笛孔，要靠选购时挑选好．虽然技艺高超的演奏家，通过按部分音孔，可以对音调作部分调整，但这不是办法，在快速演奏时就不行了．音准又包括绝对音准和相对音准，如果一个乐器的绝对音准不好而且是不可调的，或者是临时调试不方便，那么两个乐器在合奏时就“打架”了．相对音准不好，即音阶中各音不能按律制规定的关系正确发音，那即使是独奏也是难受的．

音准的稳定性也是一项乐器的声学参数．温度或湿度的变化会使乐器的音调发生变化，这主要在于制作乐器的材料的性能．尤其可怕的是在一次演奏过程中乐器音准的变化，如吹奏乐器由于以体温的空气吹入乐器之中，会使其温度渐渐升高，从而使音调也发生变化．提琴等弦乐器“跑了弦”则是调弦柱固定不好所致．

一般来说，好的乐器在同类乐器中音量是较大的.

音量的变化范围即动态范围大，也是乐器性能好的标准之一. 这就是说，轻要轻得下去，响能响得起来. 这除了演奏技巧以外，乐器本身的性能是基础.

乐器的音量还要求均匀，即在整个音域中，音量大小要差不多. 如有的钢琴低音部分盖过了高音部分，就不好了.

乐器的激发阈值和反应灵敏度. 激发阈值是指要费多大的力气才能使乐器“起动”，发出最小的声音，当然以不太费劲为好. 乐器对演奏者的反应灵敏自然是很重要的，这是指这件乐器接受演奏者的操作后，能以多快的速度作出反应，当然以快为好. 这也决定这件乐器可能以多快的速度变换发音. 通常是激发阈值高，反应灵敏度就会降低，会感到很“重”，“拖不动”.

反映音色的是频谱以及一个音起始和结束时的瞬态状况. 另外，共振峰的位置、多少、强度也会影响音色. 一件乐器的音色也要求均匀，如钢琴常常在高、中音弦及中、低音弦的连接处出现音色的“不连续”.

§4 决定乐器发声的四要素——材料、结构、工艺和演奏

乐器的表现力为什么如此千差万别、色彩纷呈，这是由哪些因素决定的呢？下面我们从乐器的材料、结构、工艺和演奏四个方面，即决定乐器发声的四要素来说明它们

对发声的影响.

首先是乐器的材料.应该说任何材料都可能制成乐器，但是有优劣之分、雅俗之分. 例如：小提琴的面板就要用杉木、云杉等，背板要用枫木. 木材的纹理要细、匀、顺，而且要用一、二百年以上的树木. 对木材的干燥度、动态弹性模量、传声速度、密度等都有一定要求，才能得到优质的提琴. 高级钢琴的琴板则要求用意大利松木或挪威的云杉、银杉，美国的白松、红松、黑松等. 这些材料的声阻低，传声快，传输损失小，共振峰高. 提琴的指板、琴弓要用硬木或特殊的木材. 弓弦要用马尾，而且还规定有一定的粗细和长度. 钢琴的琴槌也会影响音质，琴槌的毛毡较硬，则音色脆亮，较软则音色比较柔和. 胡琴的蒙皮以蟒皮为上乘，如用木板则成了板胡. 竹笛和洞箫用竹也大有讲究，其成熟程度、生长年龄、含水率、粗细、圆度、硬度、密度、弹性模量、表面光滑程度等都与声音的质量有关. 如以选用毛竹、金花竹、苦竹制笛，紫竹制箫等为好. 西洋木管乐器宜用优质硬木，至今用塑料制作的木管乐器还不能与木质的相匹. 铜管乐器则以银制为佳. 即使是弹拨用具的材料也会影响音乐的效果.

乐器的结构也对音质影响很大. 特大的乐器都是低音乐器，如大号、巴松、大贝司、大胡等，其振动频率较低. 乐器的外形大小也同音量有关，三角钢琴比立式钢琴有更大的琴箱和琴板，自然音量也大. 各种弦乐器都有共鸣箱即琴箱，有许多还有音孔. 音孔的大小、形状、位置都会影响音质. 琴马的大小、厚薄和形状、位置，也都会影响振动的传播. 钢琴有了踏脚瓣，可以使演奏增加很大的变

化. 钢琴击弦点的位置不同也会使谐波成分发生变化并改变音色. 管乐器喇叭口的形状不同会使辐射出去的声能多少有很大改变. 笛子的长短，粗细，吹孔和音孔的大小、形状，吹口处边棱的厚薄，笛尾的长短、厚薄、粗细等都能够影响吹奏出来的音质.

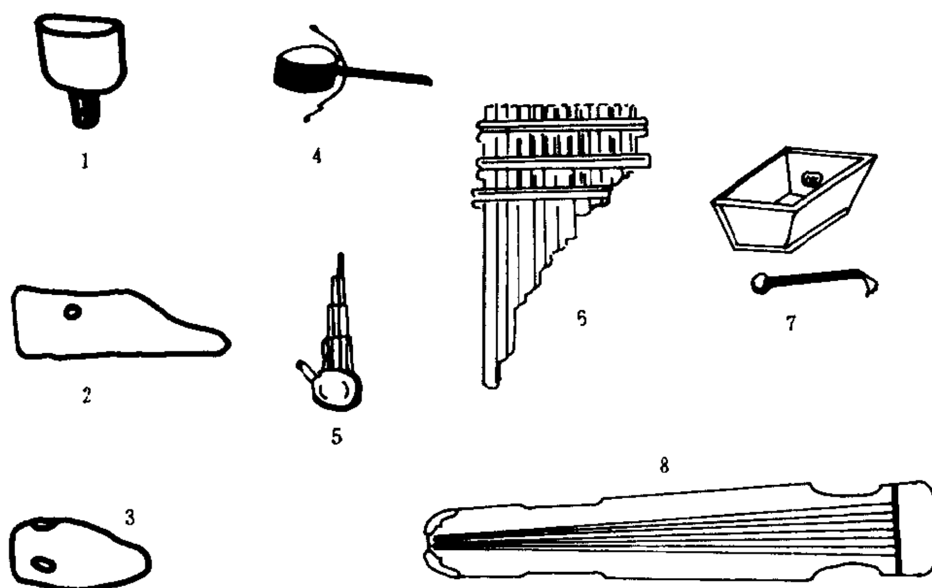
至于乐器的演奏，则各行有各行的工夫. 拉提琴的手、指、腕、臂上都有工夫. 弓法、弓位、运弓角度和力度、拨奏的速度、力量、位置、触点大小等，都会影响音质. 钢琴的手指触键和踏瓣的使用，笛的运气及口、舌、指上的工夫，手风琴的运风箱，铜管乐器的吹气方向、角度、口形等都与发声有关.

§5 管弦乐队里的声部
——乐器按发声的物理机制分类

在各不相同的乐器世界中，怎样去划分类别，找出纲目，以便研究、使用、配合呢？自古至今，乐器的分类是一门学问，虽已有个大体的端倪，但还是不无争议. 下面，让我们拣主要的谈几点：

我国古代把乐器分为八大类即“八音”. 有所谓“八音齐奏”，这“八音”实际是八种制作乐器的材料，即：金——金属材料如青铜制的钟、铙、钹；石——玉、石材料如石磬；土——陶土材料如埙、缶；革——兽皮材料如鳄皮制的鼓；丝——丝弦乐器，如琴、瑟、筝；木——木质材料的柷、敔；匏——葫芦瓢制的如笙；竹——竹制的管、排

箫等（图 4-1）.



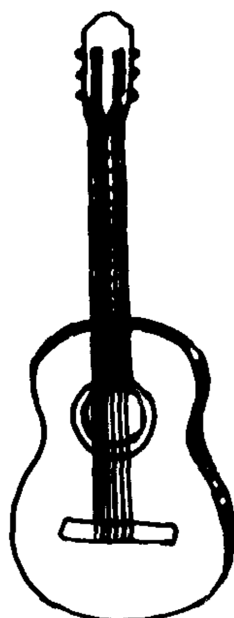
1. 金钟　2. 石磬　3. 土埙　4. 革鼓
5. 葫芦笙　6. 排箫　7. 木柷　8. 琴

图 4-1　我国古代的“八音”

还有人按用途把乐器分类，如行军乐器、宫廷乐器、狩猎乐器、伴奏乐器、民俗乐器等. 也有人以演奏方法和演奏机制把乐器分类，如吹奏乐器、弹拨乐器、键盘乐器. 也有是按发音体分类的，如弦鸣乐器、膜鸣乐器、体鸣乐器、气鸣乐器等.

管弦乐队中乐器的声部划分一般是分为弦乐器、管乐器和打击乐器三大部分，这基本上是按发声的物理机制划分的，但也仅仅是大体如此.“打击乐器”的叫法就比较含糊，实际上是指靠敲击发声的膜板乐器. 这种分类方法仅对管弦乐队有用. 还有许多乐器归不到这三大部分中，如管式钟琴就是. 我们认为，乐器按发声的物理机制可以作如下区分：

弦乐器．这是以弦振动发声而且决定音调的乐器．细分则还可以分为：擦弦乐器或叫拉弦乐器或弓弦乐器，是用琴弓与弦摩擦而发声的，如提琴、二胡等；弹弦乐器或拨弦乐器、弹拨乐器，是靠手指或拨子拨弦而发声的，如吉他、琵琶等（图4-2）；打弦乐器或击弦乐器，是靠弦槌或专用的敲击器击弦而发声的，如钢琴、扬琴等．



吉他



大提琴

图 4-2　弦乐器中的吉他、大提琴

管乐器．是以空气在管内形成驻波，由驻波波长决定音调、并从管口发声的．细分可分为：无簧管乐器，如笛类和铜管乐器（图 4-3）．笛类靠边棱起振，铜管乐器靠嘴唇起振；有簧管乐器，如双簧管、单簧管，靠簧片起振，管长决定音调．

簧振乐器．这是靠簧片振动发声的，也可以细分为：簧振乐器、如口琴、手风琴、口弦、八音琴等都仅仅靠簧片本身振动发声而决定音调，不是靠敲击而是靠吹气、鼓风或拨动簧片发声，它区别于板的振动，是一种“柔振”乐器．簧管乐器是一簧一管配合发音，以簧振为主，管起稳定音调及共鸣的作用，主要在管口发出声，如笙，管风琴里的簧管等（图 4-5）．

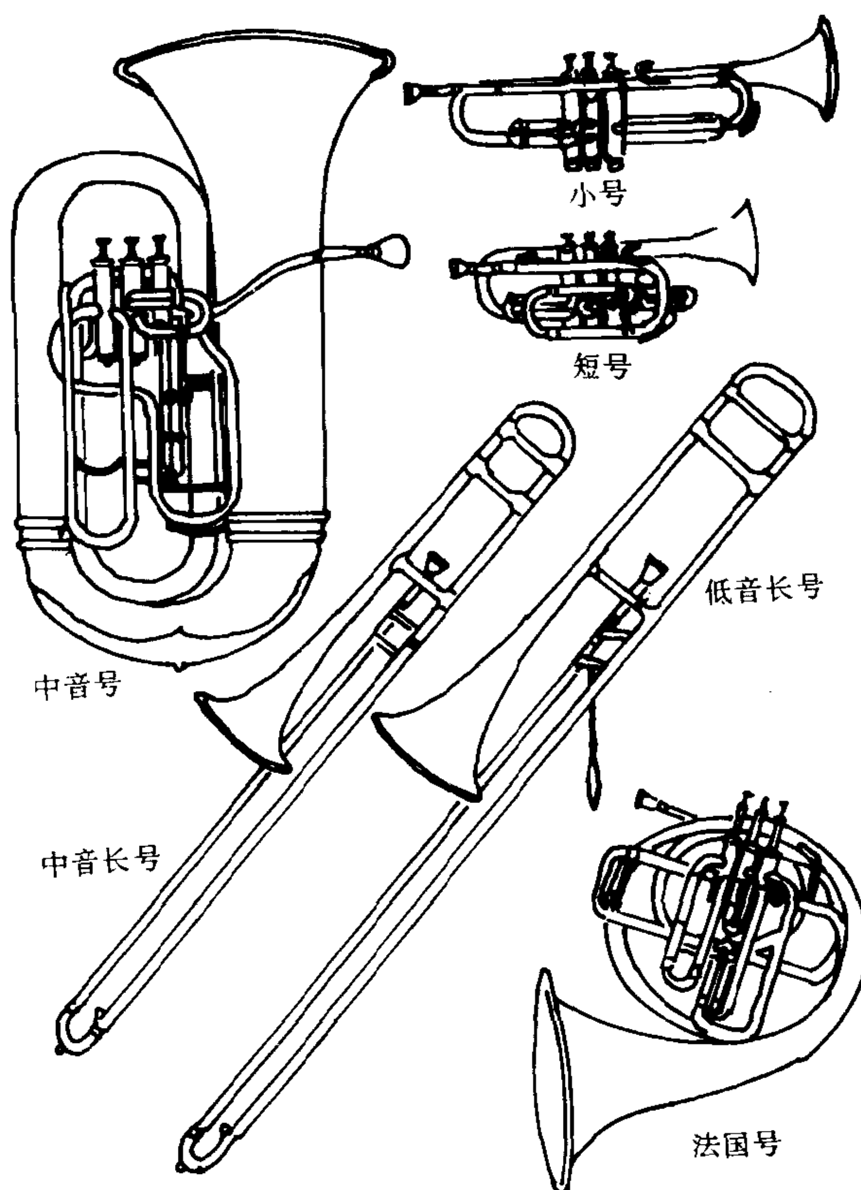


图 4-3　几种铜管乐器

膜板乐器，是靠膜和板振动而发声的．可以分为：膜振乐器，如鼓；板振乐器，如梆子、木琴，靠敲击发声，是“硬振”乐器；体振乐器如钟、钹也可以收入此类（图 4-6）．另外锯琴也可以归入此类，它靠拉弓起振．

电子乐器是靠电振荡频率决定音调，然后变换成声能，如电子琴．

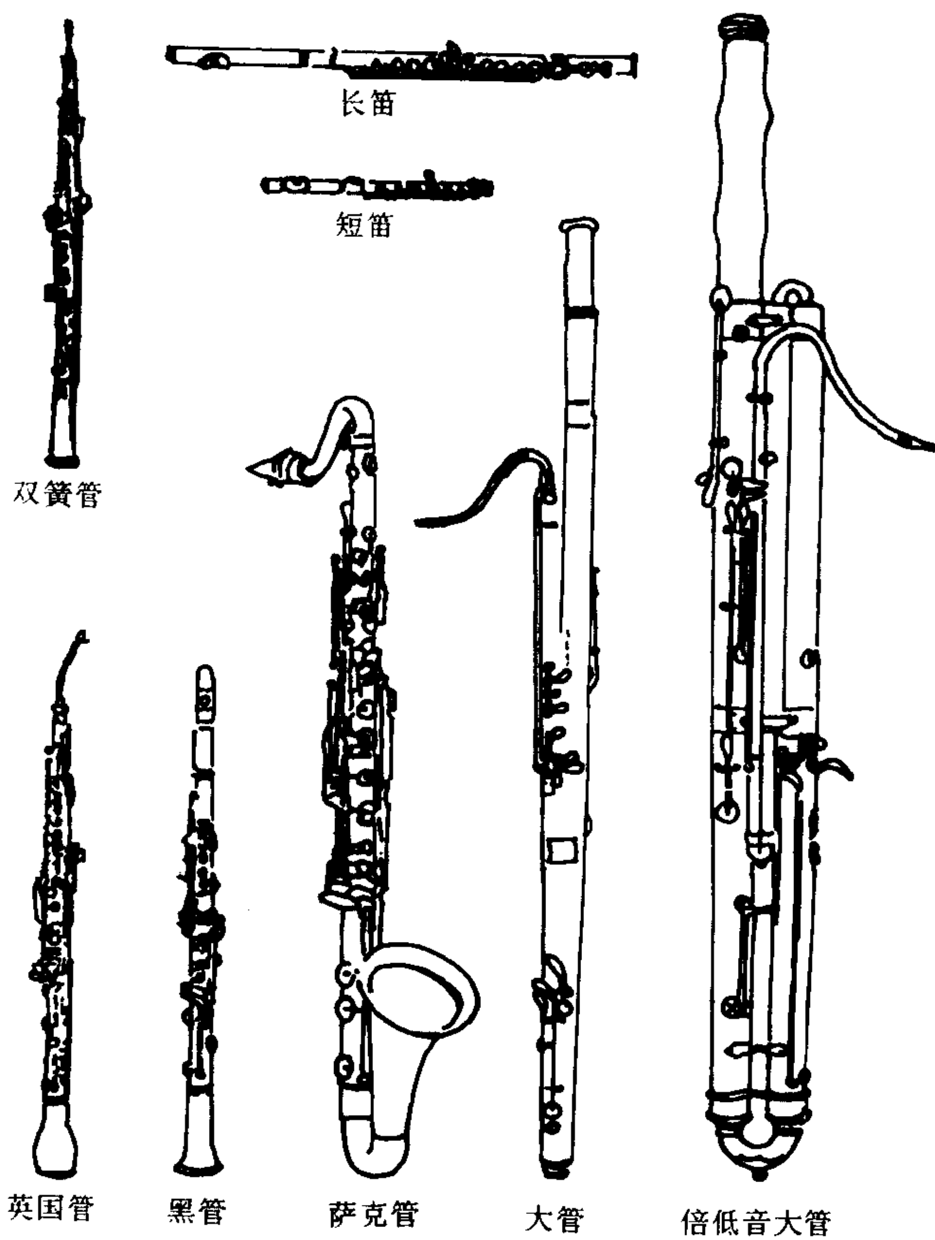


图 4-4　几种木管乐器

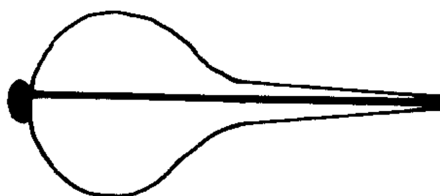


图 4-5　口弦

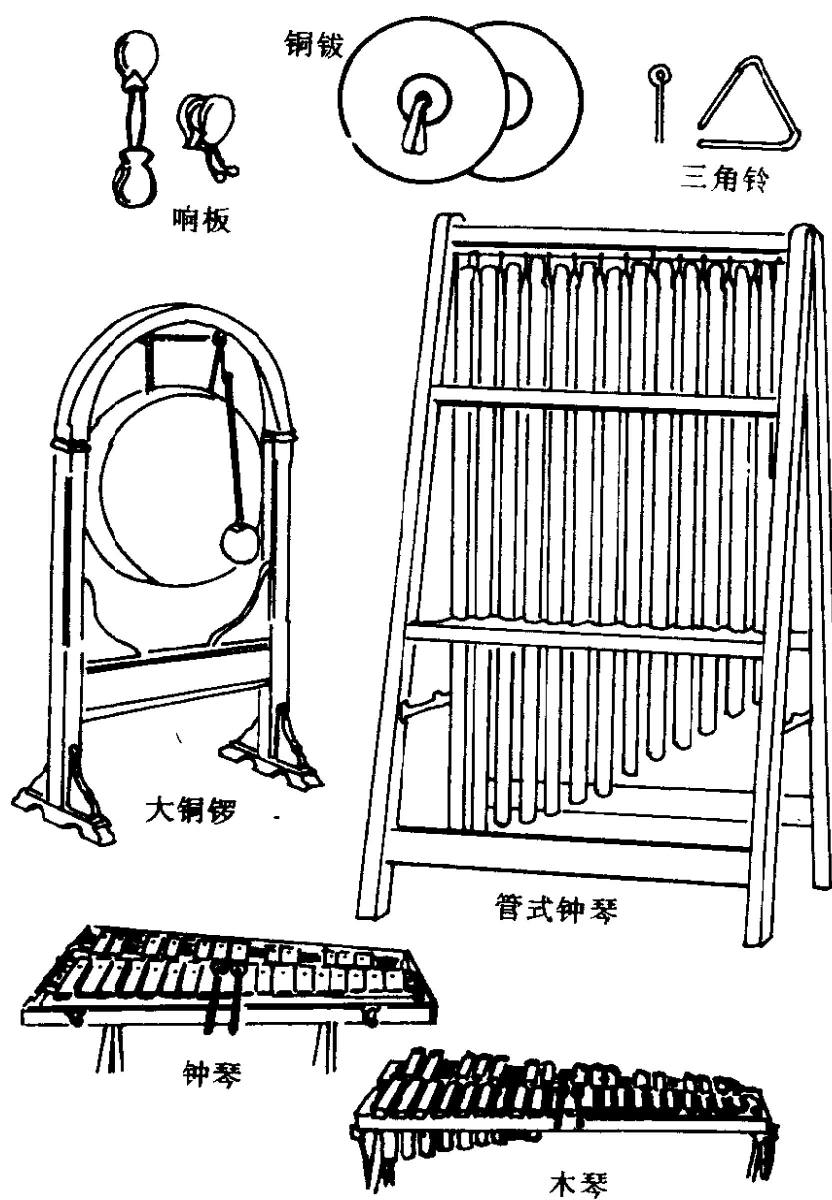


图 4-6　各种膜板乐器

§6 为什么在常见的弦乐器中，扬琴的演奏效果常常逊色——弦乐器的弦的振动模式

我们常见的弦乐器中，西洋乐器有提琴、吉他、竖琴、钢琴等，中国乐器有二胡、马头琴、琵琶、扬琴等．相比起来，哪怕有很高的演奏技巧，扬琴演奏的声音效果总是感到要稍差一些，这是什么原因呢？要回答这一点，还得从弦乐器的弦振动的几种模式讲起．

弦乐器的弦的最重要、最基本的一种振动模式是横振动．当弦受到与弦线伸长方向相垂直的力作用时，弦线就沿着与弦长垂直的方向往复振动，这就是弦的横振动．横振动是所有的弦乐器都具有的一种最基本的振动，比起别的振动模式来，它的能量最大，它决定弦振动发声的基频以及主要的谐波成分．

弦乐器弦的第二种振动模式是纵振动．当弦线受到与弦线的伸长同一方向力的作用时，就会产生纵振动．例如弓弦乐器拉奏时，运弓总不会完完全全的在与弦线垂直的方向上，而总是有在弦线伸长方向上的分力，于是就有纵振动产生．其实，任何一种触弦方式也总是多多少少有纵振动成分的．纵振动的能量不大，但它的谐波成分对决定音色起作用．

弦乐器的第三种振动模式是扭转振动．当弦线受到对于其中轴线的扭力矩时，就会产生一种扭转运动．例如拨弦乐器拨弦时，或小提琴拉弓时，松香把弓弦上的马尾

“咬住”，都会有扭转振动．扭转振动也对音色起作用．当提琴拨奏时，你一听就知道这是拨弦声．这就是扭转振动对音色的作用．

弦乐器的弦还有一种振动模式是倍频振动．倍频振动是与横振动同时存在的，每当弦线作一次横振动时，振幅要有两次达到最大，每当这个时候，弦线对其两端的固定点就要拉紧一下．也就是说，在横振动作一次振动时，弦线对其两端要拉紧两次，这就是倍频振动．倍频振动虽然对每一种弦乐器都存在，但是如果系弦点的刚性很强时，就不易显示出来，而如果弦正好系在稍柔软或弹性稍好的共鸣箱上，这部分振动就较为重要了，例如竖琴就是这样的（图 4-7）．

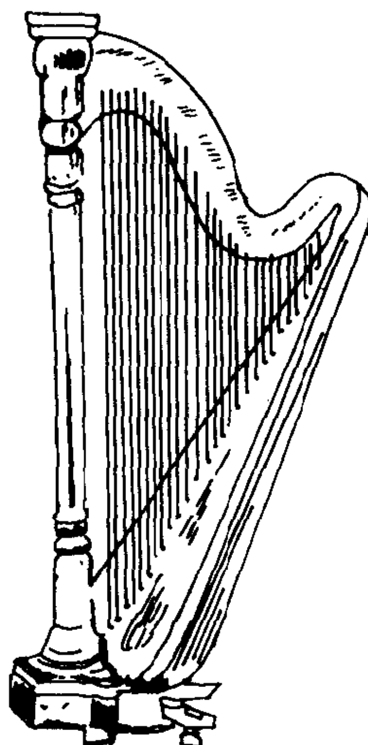


图 4-7　竖琴，弦的下端系在共鸣箱上

讨论了以上这些弦乐器的振动模式以后，我们再来看看各种弦乐器弦的振动情况：小提琴是拉弦乐器，在用力拉弓时，除了横振动外，有较大的纵振动和扭转振动，而且琴弓是自由的，可以在弦的各处运弓．运弓力量大，方向及位置变化多，还可以用跳弓、断弓等等．虽然倍频振动成分不是很大，但振动模式已经够丰富的了．

吉他是用手指拨奏的，除了横振动和扭转振动外，拨奏的方向不同，就会产生强弱不同的纵振动．加上弹奏的方向、位置、力度，是否遏止弦振动，何时以及如何遏止

等等，也是有千变万化的. 中国的琵琶则除了上述这些演奏方法和振动模式之外. 还有轮、扫、拨、挑等技法，也是极其丰富的.

在竖琴声中，四种振动模式都有很强的反映.

再看看扬琴，它是一种击弦乐器，它基本上没有扭转振动和纵振动，而倍频振动又不强，击弦方式也较单调，因此，先天不足，难怪声音就比较逊色了.

至于钢琴，虽然也是一种击弦乐器，但是它有丰富的共鸣、宏大的音量、变化无穷的触键和运用踏瓣等技巧，因此有丰富的表现力.

§7 琴弦里的学问——弦线的长短粗细、用材、紧张程度与发声的关系

我们知道，弦乐器是靠使琴弦振动而产生优美动听的乐音的，那么，到底弦线的哪些方面或哪些性质同弦乐器的发声有关呢？下面，我们采用单项分析的方法来作一些解释，即在讨论一个问题时，假设其他因素都是同样的.

首先，弦线的粗细同发音的高低有关. 倍大提琴（大贝司）的弦线就比大提琴粗，而大提琴的弦线又比中提琴和小提琴粗. 在同一把琴上，不管是提琴还是吉他、钢琴、胡琴，不同弦的粗细是不同的，越是发低音的，弦线

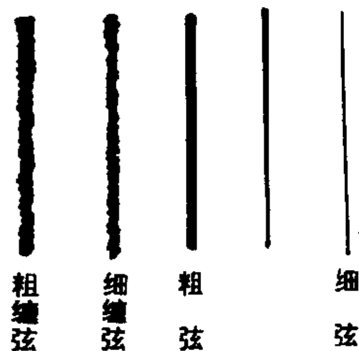


图 4-8 粗细不同的弦线

越粗．有的粗弦甚至是在一根弦线上再缠上一些弦，使它变得更粗，叫作缠弦，而不致因为用单一的材料做成粗棒而使弦线的韧性不够和音色不好（图 4-8）．

弦线的长短也与发音的高低有关．一般说来，弦线越短，发音越高，即频率越大．钢琴的每一组音中的最高音，弦线是最短的，随着音调降低而逐渐变长．在许多种弦乐器中如古筝、扬琴等，琴马放的不同位置决定弦线的不同长度，这些有序的弦线由短而长，相应发音由高而低．各种弦乐器上，手指在不同把位就改变了弦的有效长度．弦线的有效弦长越短，发音越高．又如在吉他、小提琴上都可以使用一种"换调器"，夹在各条琴弦上，就可以缩短有效弦长，使这把琴的调升高（图 4-9）．

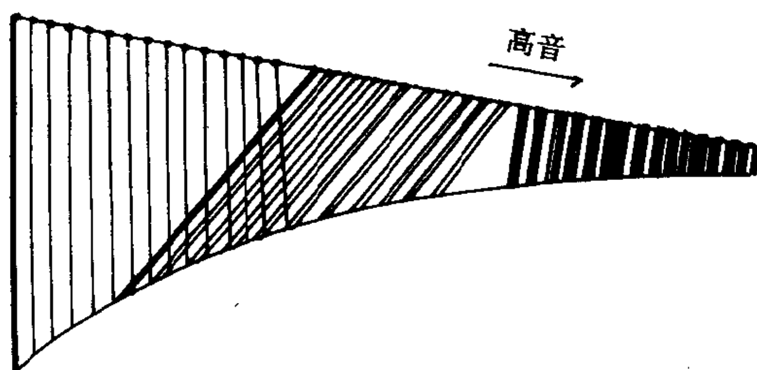


图 4-9　钢琴上的弦线排列示意

弦线绷得越紧，发音就越高，几乎所有弦乐器的调弦都是这样的．把二胡的"千斤"朝下压一压，把扬琴的马向旁边紧一紧，也为的是使弦线绷得紧一些，发音就高一些．有的竖琴有一种转调踏瓣（图 4-10），踩下一"档"，琴弦绷紧一步，琴就升高半个音，再踩下一档，琴弦更紧，于是琴再升高半音．弦线如果不紧绷到一定程度，就不能正

常地表现出一定的音色，因此，为了降低音调而放松弦线是不可取的.

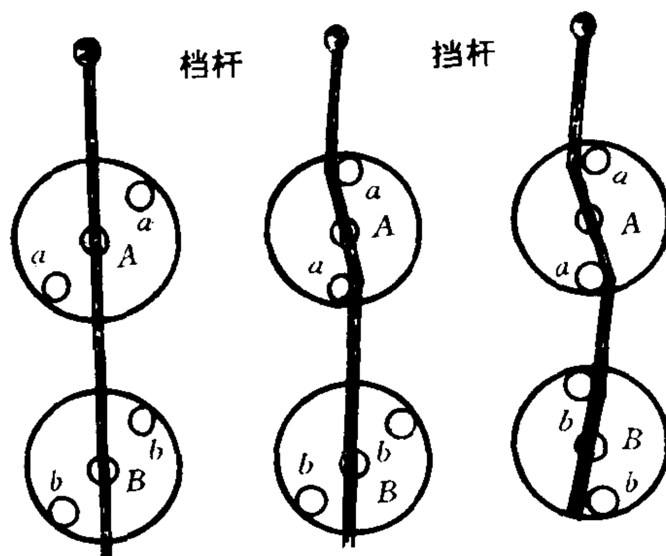


图 4-10　竖琴的变调机制

用不同材料做的弦，音色和音量是不同的，如吉他或胡琴用钢弦则发音明亮，音量大；而尼龙弦则发音柔和，音量小. 多少年来，用动物的肠线做弦，用丝线做弦，都有独特的音色，从而成为一些国家、地区或企业的传统工艺品，至今不衰.

对于同样一种规格的不同弦线，所发出的声音的音色常会有细微的差别，这是因为各条弦线的均匀程度总会有一些差别. 有过这种情况：用三根同样的弦线构成的钢琴的某个音，虽然调到了同一个音调，但有时却调不出非常“纯”和“稳”的音来，这可能是因为琴弦粗细的均匀性不够好或是钢丝打过弯. 因此，虽然可以调到同一基频音调，但却不能使其谐波和分音完全一样，而致使音发得不纯或不稳，听起来有一些“摇摇晃晃”的感觉，这种先天不足，再高明的调琴师也将是无能为力的.

§8 乐器之王
——钢琴的特点和表现力

广泛流行于世界各国的键盘弦乐器——钢琴，是乐器世界中历史最悠久者之一，也是独奏、重奏、伴奏等音乐活动中最重要的乐器之一，同时它还是一种音域宽广、表现力非常强的乐器. 至今它已遍及世界各个角落，历史上著名的作曲家都曾为之谱写过不朽的作品，因此，被人们誉为“乐器之王”.

相传钢琴起源于一种独弦琴. 据记载，公元前500—300年，古希腊时代的科学家、艺术家毕达哥拉斯发明了独弦琴，即“莫诺柯特”：一根弦下有“马”，移动“马”就可以改变音调，这是钢琴的始祖. 到了公元13世纪，出现了一种键盘乐器叫作“克拉维柯”，即击弦古钢琴，这是键盘乐器的先驱. 当弹奏者的手指撤动琴键时，根据杠杆原理，琴键内端的木杆上升，木杆上端的铜块撞击弦线而发声（图4-11）. 最先的克拉维柯是单弦的，后来发展成双弦或三弦，克拉维柯的音域也从两个八度而不断发展成为五个八度. 巴赫、莫扎特有许多作品都是为克拉维柯而作的. 当时古钢琴的黑白键与现在钢琴的黑白键正好相反，你可以从电

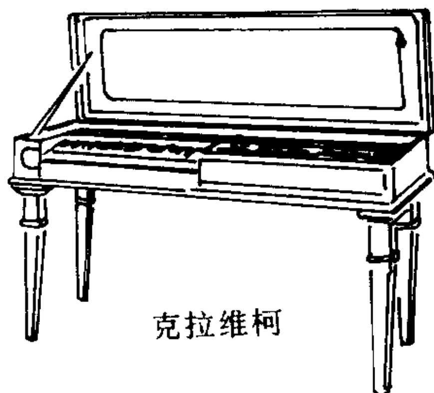


图4-11　克拉维柯

影“莫扎特”中或其他历史剧中看到这点．克拉维柯一直流行到 17、18 世纪．

16 至 17 世纪间又发明了一种拨弦古钢琴，叫作“哈普斯科”或叫大键琴．这是一种拨弦古钢琴．当手指按键时，木杆上跳，杆端的拨子拨弦而发音．用不同材料制成的拨子可以产生不同的音色（图 4-12）．哈普斯科也曾受到贝多芬的青睐．至今，许多国家的音乐博物馆里都保存有克拉维柯和哈普斯科．有许多作品都写明“为克拉维柯所作”或“为哈普斯科所作”．由于它们的音色轻柔、纯净、甜美、雅致，所以直到今日，音乐会的曲目中还有古钢琴演奏，市场上也有专门的唱片出售．在电子合成器的音色库中古钢琴也占有一席之地．


图 4-12　哈普斯科

一般认为，现代钢琴是意大利人克里斯托佛里在 1709 年发明的，而后又得到了不断的改进，如逐步扩大了音域，增强了音量，丰富了共鸣，并改用琴槌击弦，添加了脚踏瓣等．图 4-13、4-14 分别是现代大钢琴（三角钢琴）和立式钢琴．

在西方，自从中世纪以来，上层社会的青年特别是少女，是必须学习钢琴的．钢琴弹得不好常被认为是缺乏教养的表现．目前在发达国家里，钢琴的普及率很高，苏联的家庭里拥有钢琴也很普遍．近年来，随着经济的发展和人民生活的改善以及优生优育政策的贯彻，我国也出现了

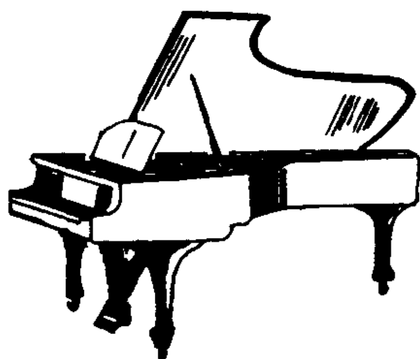


图 4-13 大钢琴

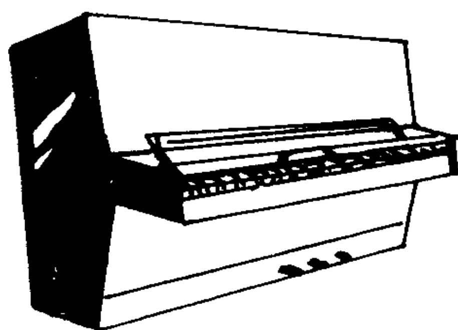


图 4-14 立式钢琴

“钢琴热”，而且方兴未艾，正向着更加扎实的方向发展. 过去，仅仅在“钢琴之乡”厦门的鼓浪屿岛上可以随处听到的琴声，如今已缭绕在北京、上海等城市住宅的上空了. 钢琴的普及程度是一个国家人民文化素质水平高低的标志之一. 我国钢琴年产量 1990 年已达到 2 万多台，而且还在逐年增长，较优质的钢琴供不应求.

钢琴是一种可以独挡一面的乐器，一场正规的音乐会，可以只有一种乐器，那就是钢琴，而小提琴则非有帮衬不可. 在排练歌舞、舞剧或戏曲时，可以用一台钢琴来抵挡，然后再与乐队合乐. 作曲家作曲时常常要依仗于钢琴. 写作总谱时也常常是先写钢琴谱. 正规的音乐学校，不管什么专业，首先要学习钢琴，这是必修课. 业余音乐爱好者在学习各种乐器如小提琴时，也最好学习一段时间钢琴.

为什么钢琴能在音乐中具有这么重要的地位，一直是一个“主流派”，并被称作为“乐器之王”呢？主要是它独具的非凡的表现力，从千军万马、惊涛骇浪到潺潺流水、细语低声，无一不可以表达，而且随心所欲、千变万化. 下面我们将从其物理基础上来略略予以说明.

首先，钢琴的音域广. 它的发声频率范围可以从 27.5

赫兹以下到 4186 赫兹以上，在各类乐器中，除了大型管风琴以外，是音域最宽的乐器.

第二是它的音量大，通过把系弦板从木质变成钢板，增大弦的张力，加大体积，改进音板，增强共鸣等措施，钢琴的音量已相当大，可以单独在一个音乐厅里进行独奏，而无需扩音设备.

第三是它可以奏出和声. 钢琴可以同时或很快按下许多个键，发出各种和弦声，利用脚踏板还可以大大扩展和声效果.

第四是音色丰富. 由于钢琴的特殊结构，即所有的琴弦都紧固在一块钢板上，因此，即使弹奏一根弦，其它的弦也能“感应”而发出谐波，因此谐波特别丰富. 另外，非常重要的一点是，钢琴采用的是十二平均律，所以弹奏和弦时（以此为主弦），本身形成整数倍的谐波，与作为和弦音的另一根弦发出的与主弦关系为非整数倍的“倍频”相互作用，形成了极其复杂的“分音”和“拍音”，从而极大地丰富了钢琴的音色.

还有一个重要的特点是，钢琴可以通过演奏时变换击键和使用踏脚瓣的方式，随心所欲地控制力度和音色，使强弱适度，并有千变万化的表现力.

由此可见，钢琴完全符合一件好乐器的条件：可以控制音长（即时值）、和弦、频率（即音调）以及其共鸣的模式，使一首乐谱跃然于琴上，显示出各个演奏家千差万别的风格和心态情怀.

§9 击弦机和踏脚瓣
——钢琴里的杠杆

钢琴之所以具备非凡的表现力，除了由钢琴本身的结构、材料和工艺决定外，很重要的是靠在演奏时操纵钢琴中的两套主要的杠杆——击弦机和踏脚瓣来实现的.

钢琴中的击弦机构是一套非常复杂而灵巧的多级复合杠杆，它显然是一台原始的力学机械，如图 4-15 所示. 当

图 4-15　立式钢琴的击弦机构示意图

手指弹奏钢琴时，通过杠杆传动，钢琴的击弦槌就敲击琴弦. 如果击弦槌的起始位置距琴弦近，则用同样的力弹奏钢琴时，击弦的冲击力就弱，弦槌与琴弦接触的时间就长，接触的面积也大，这样，高次谐波就会被遏止，音量较小，音色较“干净”；反之，如果弦槌的起始位置距琴弦远，则

击弦时冲击力强，弦槌与琴弦接触时间短，接触的面积小，这样音量就大，高次谐波保留得多，音色丰富．这就是钢琴的力度，即加速度问题．一般情况下，钢琴低音区的弦槌位置较靠近琴弦，音色就深厚、柔和；而高音区的弦槌位置距弦较远，音色就丰富、明亮．

除了触键以外，离键也是一种演奏艺术．因为按下琴键时，制音毛毡同时离开琴弦，于是琴弦振动不受遏止．同时，通过琴板与其它弦线发生共振．而手指离键时，制音毛毡又同时把琴弦"捂上"．因此，手指离键的速度会对音色产生影响．

钢琴的击弦机还有一个特殊的要求，即能够迅速地恢复原位，以便在接着重复演奏这个音时，能够把音断开，保持一个很短的时值，并且很均匀、很迅速地对手指的动作作出反应．好的钢琴要求一秒钟内同一个键可以弹出 12 次才算合格．

下面讲一下钢琴的另一套杠杆：踏瓣．一般钢琴有 3 个踏脚瓣（图 4-16），靠右边的踏脚瓣学名叫制音踏瓣，因为它是控制制音器用的，或叫强音踏瓣、延音踏瓣．如果不踩这个踏瓣，手指离开键时，制音毛毡就会同时把琴弦"捂住"，而踩下这个踏瓣后，手指离键时制音器就不再把琴弦捂住，等于手指没有离开琴键（图 4-17）．这样琴声就可以加强、延长．更重要的是通过琴板加强了各弦之间的共鸣，在许多音上产生丰富的谐波．踩下右踏瓣时，在一段时间内，手指所按下的所有各键都在发音而且参与共鸣，于是就"热闹"非凡，显得和声很丰富．这样做往往可以掩盖演奏者的某些缺陷或不足，骗骗欣赏水平不高的听众．

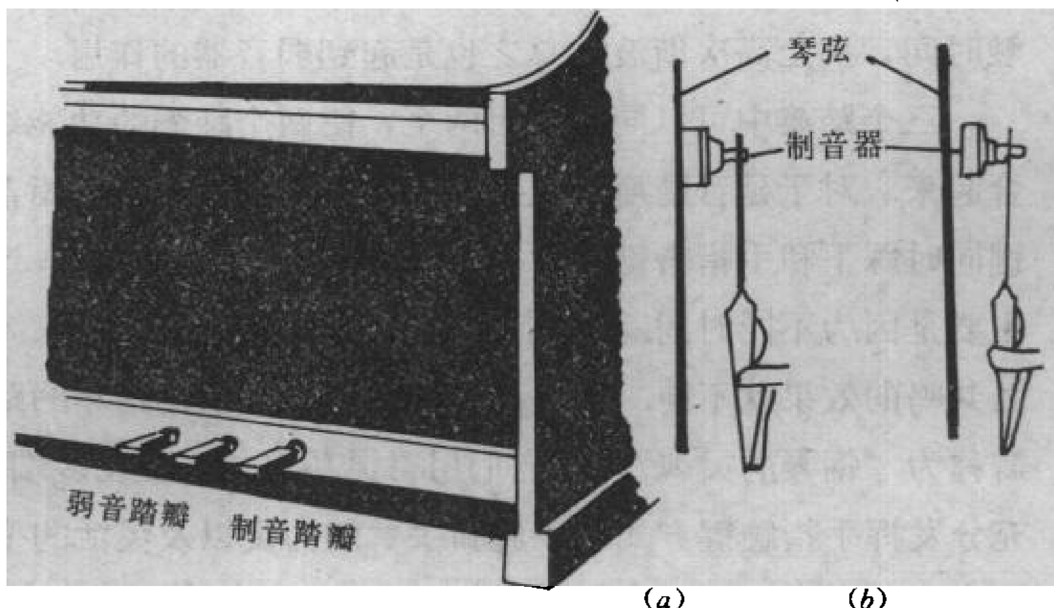


图 4-16　钢琴的踏瓣　　　图 4-17　(a)制音踏瓣未踩下时
(b)制音踏瓣踩下时

但也不可乱用，使和弦“打架”，出现一片杂音.

踩下钢琴左边的踏瓣，是使击弦槌的起始位置靠近琴弦（图 4-18）. 因此，这是一个弱音踏瓣. 在早期也有是使琴槌错位，使琴槌只能敲击到三根琴弦中的两根，以起到

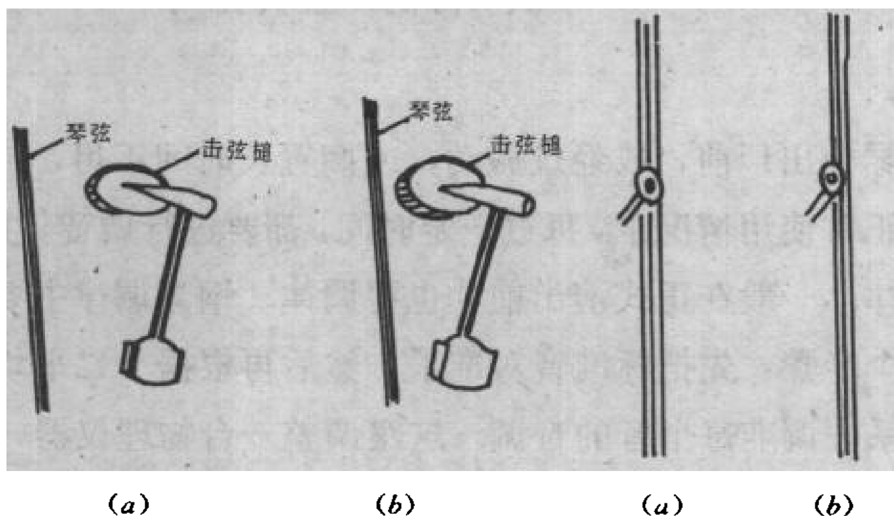


图 4-18 (a)弱音踏瓣未踩下时　图 4-19 (a)弱音踏瓣未踩下时
(b)弱音踏瓣踩下时　　　(b)弱音踏瓣踩下时

减弱音量的作用（图 4-19）. 有三个踏瓣的钢琴，踩下中间踏瓣，可以使琴槌与琴弦之间夹上一层薄呢子，这样，可以降低琴槌击弦的力量，增加击弦槌与弦的接触面积和接

触时间，抑止高次谐波．总之也是起到弱音器的作用．

三个踏瓣中可以同时使用两个，使两个踏瓣的功能综合起来．对于延音踏瓣，先于手指击键踩下，或与手指击键同时踩下和手指击键后再踩下，效果是大不相同的．这主要是因为不同时间踩下这个踏瓣，被弹奏的音与其它琴弦共鸣的效果就不同．因此，弹琴的行家甚至把钢琴的踏瓣称为“钢琴的灵魂”，把它们用得灵巧自如，变化多端．充分发挥手指触键方式，手腕和手臂的力度以及灵活的变化使用踏脚瓣，可以使钢琴的演奏出神入化．这既是演奏家的艺术，也要归于钢琴上的这两个灵巧的杠杆——击弦机和踏脚瓣．

§10 钢琴调音
——一次实际的声学实验

钢琴在出厂前，或经过搬动，或搁置长时间不用，或者是在正常使用情况下，每过一定时间，都要进行调音，主要是调律．一般在正式演出前，也要调律．钢琴调律主要包括两个步骤：先把标准音对准了，然后再根据十二平均律的关系去调准每个音的音调．这跟调整一台物理仪器一样，对准标准音高就是找到基准点．按平均律制调准音，其它音也即可算是标准音的传递．基准点是可以通用的，比如用国际标准音高 a^1 的频率是 440.00 赫兹，也可以根据自己所为而另行决定．常常是用一支标准音叉来校准基音的．

一般情况下，无论是使用还是不使用，经过一段时间后，钢琴的音调是会变低的．这是因为琴弦总是会变松，即张力变小了，于是弦的振动频率也会变小，音调变低．调整的办法是用专门的套筒扳子旋转音栓把琴弦拧紧（图 4-20），使张力恢复．

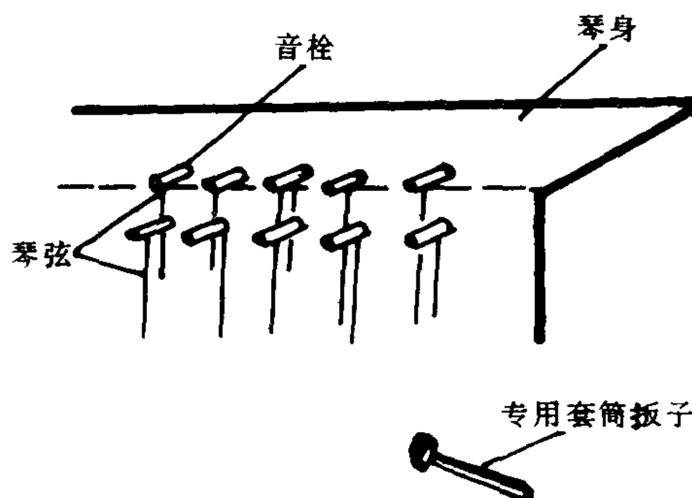


图 4-20　钢琴的音栓

从标准音开始调整其他各音的步骤是：先把一个八度里的十二音调好，然后再按八度传递到全琴．调整一个八度内各音的方法还可以用电子调音器发出每一键音的“标准频率”去一一对准．但目前主要采用的方法是靠用耳朵分辨拍频来判定，例如，纯五度的音程是 702 音分，而平均律的五度是 700 音分．因此，按下钢琴上的五度音就可以产生基音的三倍频与五度音相差为 2/700 的拍频（图 4-21）．如对于 c^1 与 g^1 来说，可以产生约为 1.1 拍每秒的拍频．如此类推，可以靠拍频及听觉来判断每个音是否已经调准了．当然，从理论上可以给出一张哪两个音之间的拍频应是多少次的表格．要说明的一点是，因为听觉的主观

因素，钢琴上听起来的八度关系不完全严格是频率翻番的关系，最后还是靠耳朵来解决的.

“调音”的含义要比“调律”广，不仅包括音准，还包括音量和音质等.

有时会遇到整个高音段音量调不上去的情况，这时，就不仅仅是调律的问题了．有一种办法可以试验，即把击弦点变动一下，常常是下移，或许可以解决问题．而此时琴的音色也改变了，因为击弦点下移，谐波成分也不同了．这种做法我们并不提倡，因为弄得不好将不可收场，还必须请高明的调琴师来解决．当然，还有许多办法可以改善钢琴的音质.

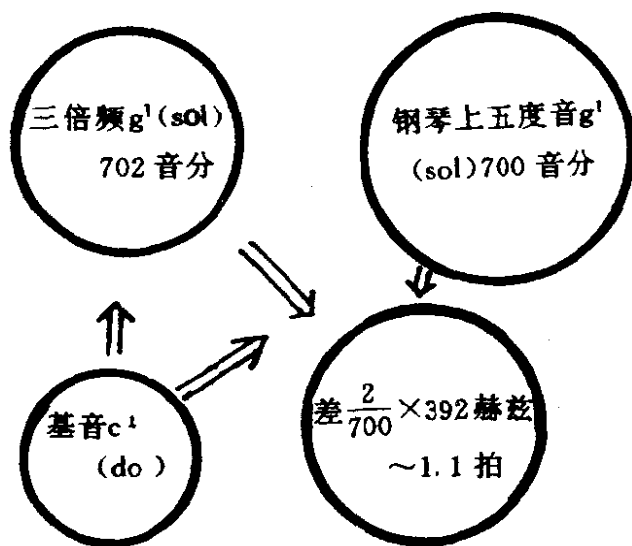


图 4-21　钢琴利用拍频调律

标准的立式钢琴，从低音开始数到第 31 键以后，每个音是三根弦．这三根弦必须调得音调非常一致．也曾有人设想过把三根弦的某一根调得稍有差别，以取得“拍”的效果，但实际上一般是不允许这样做的.

由此可见，钢琴调音不仅是一次声学实验，而且也是一次听觉的心理测验．琴调得好不好，最后还是凭调音师和音乐家的“感觉”来判定的.

§11 为什么提琴的音色如此之美
——提琴中的物理

提琴已经是乐器王国里最重要的家族之一. 没有提琴，就成不了“管弦乐队”. 在任何一个文明国家里，没有提琴，音乐也就没有立足点.

任何一件乐器，从物理角度来看都是一件发声仪器，提琴当然也不例外. 但是，作为一种优良的乐器，要求音域宽广、音质优美、强弱多变、运用自如. 它们的物理背景又如何呢？前面虽然我们在讨论各种问题时举过不少提琴的例子，现在让我们围绕着提琴的一些问题再做进一步的探讨.

提琴是一种典型的弦乐器. 弦越长、越粗，发音越低；弦越短、越细，发音越高. 一般提琴家族里的四兄弟从倍大提琴（大贝司）到大提琴、中提琴以及小提琴，形体越来越小，弦线越来越细而发音越来越高. 有的乐器制作家还在这四兄弟之间再加上四位，成为“八兄妹”，即在倍大提琴与大提琴之间插上一个“次倍大提琴”，在大提琴与中提琴之间插上一个“次中音提琴”，再在小提琴之后加上两位更小的小妹妹：高音小提琴和倍高音小提琴. 每把琴上的弦都有粗细不同的有规则变化（图 4-22）.

每把提琴上有四根弦，可以奏出不同音调的音，不像胡琴上只有两根弦. 提琴的弓是“解放”的，这样就可以扩大音域，又可以加大强弱力度的变化，并且可以充分发

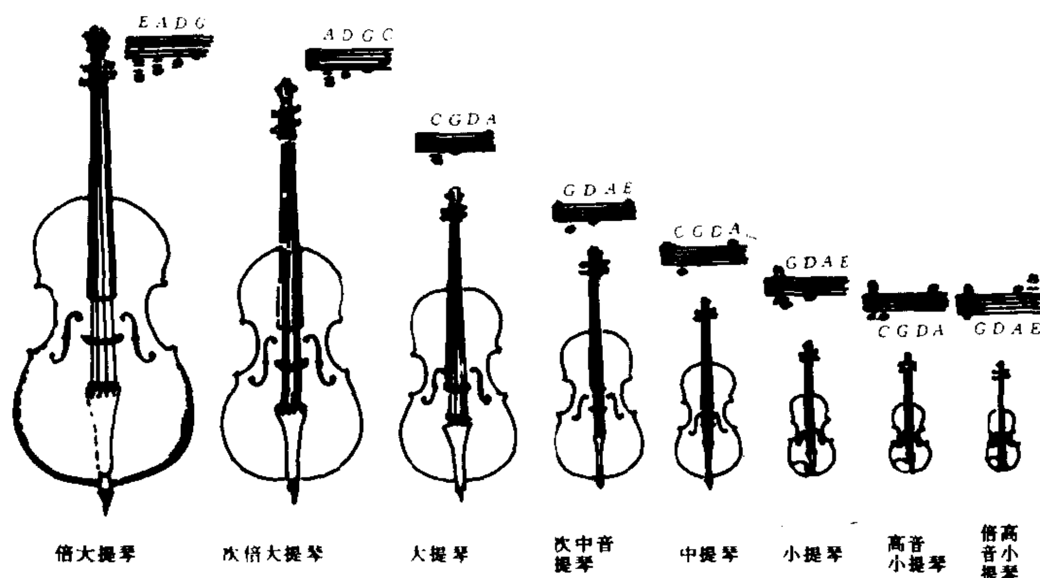


图 4-22　提琴家族的八兄妹

挥各种运弓技巧.

改变琴弦的张力也可以改变音调,调弦就是这个道理.改变弦的紧张程度同时也改变了音色.为了使琴的音色明亮些，可以把弦调到标准音调以上.有人试图用使弦线放松的办法降低半个音，但指法不变，这是不可取的，因为这样会大大地影响音色，发音“疲软”，拉起来“不对劲”.除了弦线张力以外，作用于提琴各处的力及其变化，如拉弓时，作用在琴马脚下的力，也会显著地影响音色.

除倍大提琴是四度关系外，每种提琴的几根弦之间都是五度关系.这样,各条空弦之间就有更好的谐波耦合.许多著名作曲家的提琴作品如贝多芬、布朗姆斯、柴可夫斯基的小提琴协奏曲都是 D 大调的,这是利用 D 弦空弦使音色更好，更易发挥提琴音色优美的特长.

制作小提琴用的木材和弦线材料非常讲究.这一点我们已经讲过，如弦线有羊肠线、尼龙线、钢丝等.不同的弦线做出的弦音色不同.各种材料都必须经过严格的人工老化处理，其中物理方法有热处理、光处理、微波处理等.

琴马、音柱还有音梁等的大小、形状、放置位置等与音色也大有关系. 琴马太小，音色单薄，声音传导不好. 在琴马上夹一些物体可以当弱音器使用. 安装音柱是一门“高技术”. 有时“一着定乾坤”，起“妙手回春”的效果. 你的提琴音色不好，经过高手拨动一下，常常可大为增色.

提琴的演奏技巧千变万化，有各种弓法和指法，如连弓、分弓、跳弓、飞跳弓，拉单音、双音、和弦、滑音，揉板，拨弦，泛音奏法等. “近马奏法”可以发出“金属色彩”，“近指板奏法”的声音呈“羽毛状”，如蒙上一层薄纱的感觉，“弓背奏法”则有尖锐的金属音色. 所有这些“弓法”和“指法”，无非是充分发挥提琴结构上的优点. 由于提琴发音甚为复杂，因此现在的一般电子合成器很难模拟.

§12 小号的活塞和笛子的音孔 ——管的定律

笛子、小号、长号等管乐器，要在一件乐器上吹出许多不同的音，它们是怎样发出声音，怎样变化音调并操纵自如的呢？其理论根据就是“管的定律”——管长决定音调，改变管长就可以改变音调.

管乐器的管有两类，一类是“开管”，即乐器的两端都是直接通大气的，如笛子，一端是第一个没有按住的音孔，另一端就是吹孔. 另一类管是“闭管”，即一端封闭，只有一头是直接通大气的，如一些木管乐器的喇叭口或没按住的音孔，而吹嘴则把吹气口堵住了，因此是闭管. 注意，

“闭管”并不是两头都“闭”的，只闭一头.

当相同频率、相同强度、相同振动方向的一列前进波与一列反射波叠加时，就形成“驻波”，好像波驻扎不前，介质分子或物理量只是在原地变化其大小而已（图 4-23).

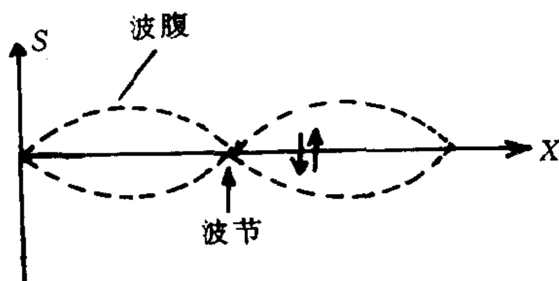


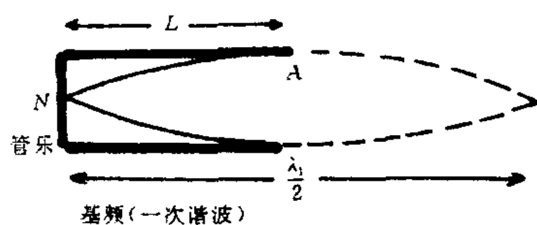
图 4-23　驻波

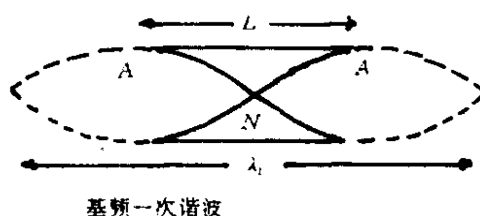
声波在闭管和开管里形成的“驻波”是不一样的. 在闭管里，闭的一端是“波节”，即这里的振动振幅最小，开的一端是“波腹”，这里的振动振幅最大（图 4-24). 在“开管”情况下，管的两端都是波腹（图 4-25). 因此，同样长的管子，开管和闭管形成的声波的频率和谐波数是不一样的. 声振动通过开口处传递给管口外的空气，使管口附近的空气先振动，再通过介质（常常是空气）传到人的耳朵. 因此，管子越粗，吹气用力越大，空气的振动能量也越大，发声就越响.

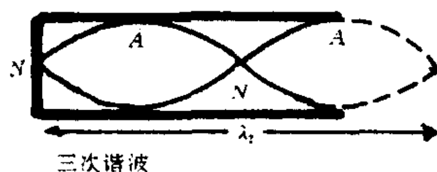
改变管乐器管长的方法有以下几种：

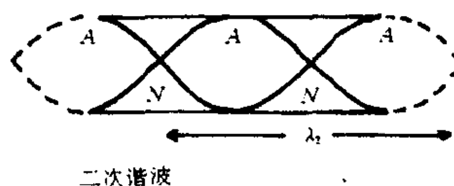
一种是在管上按设计开若干个孔，比如竹笛、箫、双簧管、长笛、短笛、唢呐等等. 用手指按住或放开一些孔，则从吹口到第一个开孔之间的距离就是管长（图 4-26). 当然它的发声频率还与其他许多因素有关，需要做许多修正. 最重要的管长修正与管的形状和直径有关. 我国晋朝的荀勖早就发现了这一点，而且给了定量的计算方法.

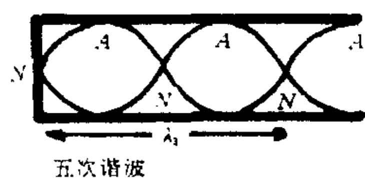
小号、圆号、大号都有若干个按键或旋钮，按下或不按下按键，旋转或不旋转旋钮，可以使支管附加部分或附

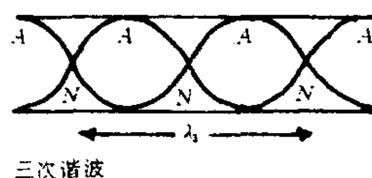


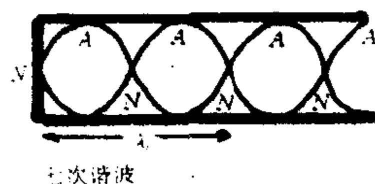












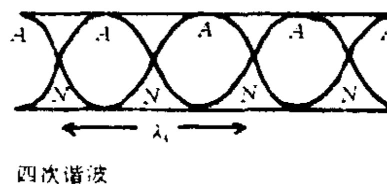


图 4-24　闭管中的驻波
N 是波节，A 是波腹
L 是管长，λ 是波长

图 4-25　开管中的驻波
N 是波节，A 是波腹
L 是管长，λ 是波长

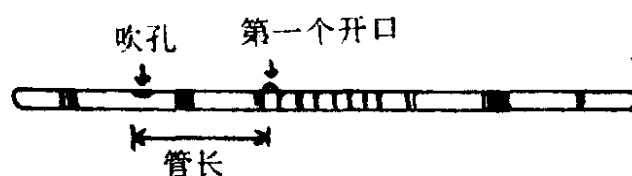


图 4-26　笛子的管长

加或不附加在原来管长上，使乐器能在三度或四度音程范围内改变音调．这种附加管长的方法，有用活塞式按键如图 4-27．当按下按键时，实际气路即管长就变长了，音调

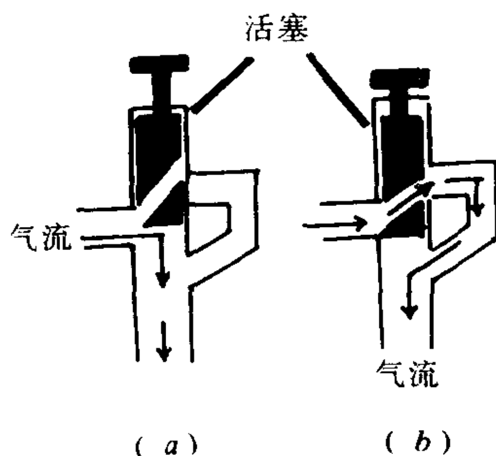


图 4-27　活塞式按键
(a) 未按下按键
(b) 按下按键

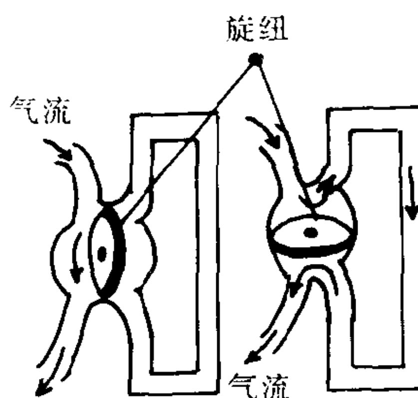


图 4-28　旋钮式
(a) 旋钮放在正常位置
(b) 旋钮拧过 90°

变低．还有一种附加管长的方法用的是旋钮（图 4-28），当旋钮拧过 90°时，实际气路就变长了．

长号改变管长的办法最直截了当，把附加管“拉进拉出”就可以改变管长，所以也叫作拉管．只是管的长短没有客观依据，全凭经验和感觉，不易对准罢了．

原始的号是很长的，如一个圆号的管长有好几米，后来不知哪位聪明人想出把管子盘起来，一直至今．如今我国西藏喇嘛寺举行庆典时，还扛着两个极长的“管号”在吹哩！如图 4-29.



图 4-29　“管号”

§13 为什么单簧管和双簧管是管乐器而不是簧管乐器——管乐器的发声机制

顾名思义，单簧管（也叫黑管）和双簧管一样，是有簧片的，它们的簧都在吹嘴里．单簧管是一片簧，双簧管是两片簧，大管和英国管也都是双簧管．那么，为什么明明有簧，但又不算簧振乐器或簧管乐器呢？这是因为单簧管和双簧管的簧只起到起振作用，而不起决定音调的作用．

当演奏者用嘴吹奏单簧管时，簧片与基板拍打而起振，而双簧管则是靠一对簧片相互拍打起振．这时，吹嘴旁边的气流中产生了包含有各种频率成分的小振动，而只有与有效管长相匹配的这些频率才被选择出来而形成驻波，决定音调．前面我们已经讲过，由管长决定音调的乐器叫作管乐器．因此，单簧管和双簧管是管乐器，而由簧片本身振动的固有频率决定音调的才算是簧振乐器．

单簧管和双簧管是有簧管乐器．笛子、小号等则是无簧管乐器．笛类乐器是用边棱起振的，笛子或箫等的吹口有一个尖劈的边棱．我们能体会到，在吹笛子时要用口“找”到位置，吹气下去，在吹口的边棱附近就造成了含有多种频率成分的空气漩涡，于是，再由管的有效长度决定选出相应的频率成分，在管内形成驻波．

至于铜管乐器则是嘴唇上的工夫．两片嘴唇有点像双簧管里的两个簧片，拍打起振，找到频率部分与铜管乐器管长相匹配的，在管内形成声驻波（图 4-30）．

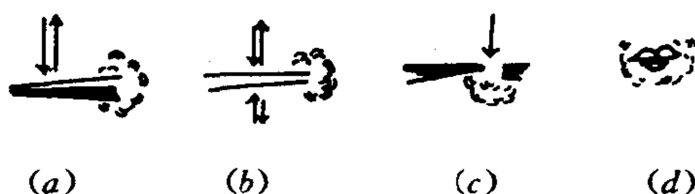


图 4-30　有簧和无簧管乐器的激励机制
(a) 单簧　(b) 双簧　(c) 边棱　(d) 唇簧

§14　笛子——笛子里的物理问题

不论在中国或者外国都有笛子，很少有人没见过笛子的. 不管是作为一种乐器来吹也好，还是由于好奇随便吹上几下玩玩也好，许多人都吹过笛子. 笛子是最古老的乐器之一，人们拔一根苇管来吹，这就是最原始的笛子. 我国 1987 年在河南出土的骨笛——在兽骨上开几个孔，已远在 8000 年以前（图 4-31）.



图 4-31　骨笛　　　图 4-32　横吹、竖吹都是笛

现在我们看到的笛子是横吹的，在中国古代，横吹的、

竖吹的都叫作笛，只是到了后来才把竖吹的叫作箫，到现在也还有竖吹的叫竖笛（图 4-32）.

西洋乐器里，正规的管弦乐队中有长笛和短笛，短笛发的音要比长笛高一个八度．如老斯特劳斯的“拉科齐进行曲”，用短笛在高处“挑”几下，别有味道．中国笛最普通的有曲笛和梆笛两种．曲笛长，用于昆曲等剧种；梆笛短，用于梆子等．一般梆笛比曲笛的音高出四度.

笛子是一种管乐器．笛子越长，吹出的音调越低；笛子越短，吹出的音调就越高．你可以做一个实验：把开水灌进暖瓶里，可以听到从低到高连续的声音，这是因为暖瓶里的水面逐渐升高，从水面到瓶口这一段“管长”越来越短的缘故．当然这个实验中的管是一端闭口，一端开口的“闭管”，而笛子是两头都开口的“开管”．开管与闭管的区别，我们前面已讲过了.

我们已经讲过，吹笛子的时候，用手按住或放开一些侧孔，就是改变管长，也就是改变音调，可以吹出“1（*dol*）”、“2（*rei*）”、“3（*mi*）”、“4（*fa*）”、“5（*sol*）”等不同音调的音来．当然，事情没有那么简单，笛管的粗细，外径和内径的大小、形状、变化程度，管壁的厚度，侧孔、吹孔的大小、形状，管尾——即最后一个侧孔以下的长度等等，都与音调有关.

以上这些结构因素，不但影响音调，也影响音色．一个明显的例子是，笛子的管径太细，吹出来的声尖里尖气，很不好听，或甚至吹不出声来.

使用笛膜是我国竹笛的一种特色．在笛膜上大有学问．常用天然的竹子管内的“竹衣”做笛膜．笛膜的贴法也很

重要，有了好的笛膜，可以加强气流的振动，发出浑厚、脆亮而动听的声音．不信还可以做一个极端的实验：用一张纸做笛膜，声音就不堪入耳了．笛膜距吹口距离也与音色有关：距离近，高音亮；距离远，低音亮．

笛子的材料也与音色有关，金属材料比较稳定，竹子则易变形．好的竹笛用材要经过严格挑选，因为在笛管里形成驻波的质量与材料的密度、弹性膜量、厚度等都有关．当然还要求不开裂，无虫眼，无疤痕，无汗渍，表面光洁等．何处生产的竹子、什么品种的竹子适宜做什么，都是有规定的．还要对材料进行烘烤处理，太干则还要加湿．

笛子的吹奏技巧也至关重要．吹奏无非是“运气”和“运指”．口形，吹气的角度、强弱，口与吹口的距离不同，就可以有不同的气流在管内耦合，得到不同的音色．“气振音”是使气流振动，“气变音”是改变口风及气流使音调改变，“气冲音”是用丹田气冲击发出断音．还有用舌头改变气流，有“轻吐”、“单吐”、“双吐”、“三吐”等．

至于指头上的功夫，可以有滑音，即连续改变按住一个音孔的多少面积；微分音，即按住一部分音孔；颤音，即快速、反复地使按音有微小变化；叠音，即很快的上倚音；指震音，即手指在音孔旁震动以变化强弱；垛音，即强的叠打音，等等．这些也都是改变管长或气流的运动方式．

最后讲一下笛子的音调随温度的变化很大．如果温度改变 10℃，音调可以改变约 1/3 个“半音”．这是一般人都能听得出来的，会使整个乐队的音搞得一塌糊涂．这是一个很实际的问题，弄得不好，笛子的音会越吹越高的．把竹笛改成两截，微微的调节管长，可以调整音调．这是从

外国学来的．图 4-33 是可以改变管长的笛（图 4-33）．

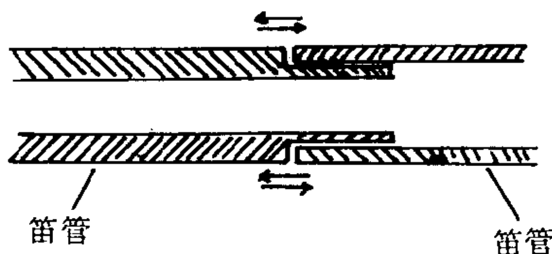


图 4-33　改变笛子管长的机制

§15　八音琴——一种靠发条演奏的簧振乐器

当你在下午整点到故宫博物馆钟表馆参观时，时间一到，许多台古钟就热闹起来了：有的是钻出一只公鸡脑袋啼叫几声，有的是出现一群松鼠上下飞跑，或者是七彩琉璃棒转动起来了等等．与此同时，又都伴随着发出一阵阵叮叮咚咚的动听的音乐，这就是八音琴在歌唱．

时过几百年，而今八音琴又时髦起来了．无论是在美国的玩具商店里，在台湾、香港的市场上，在荷兰的街头，在莫斯科的小店里，在中国的外汇商店和礼品商店里，做成漂亮的工艺品的八音首饰盒、八音娃娃、八音风车、八音乐器模型、八音汽车等等，又琳琊满目、比比皆是了，而且更加花样翻新，玲珑小巧．在米兰、维也纳、哈瓦那等地的音乐博物馆里，有些八音琴大得像一台机器，有的则是微型的；有盒式的，也有盘式的等等．许多人都喜欢听它那清脆悦耳、银铃般的声音．有的八音琴还能奏出多声

部的“大曲子”哩！

八音琴是一种簧振乐器，属于一端固定的“自由簧”．拨动自由端，簧片就振动发声，其发音的频率高低与簧片的长度、厚薄、形状和材料性质等有关．簧片越短，发音越高．音色则决定于材质和簧片的形状．

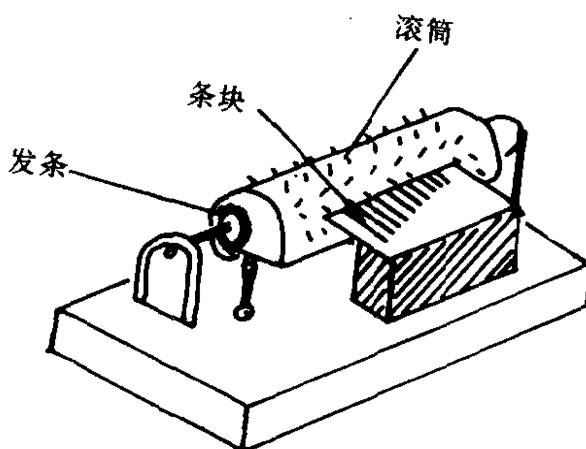


图 4-34　八音琴的示意图

现时，一般所见的八音琴的基本构造（图 4-34）是一块有一定厚度的优质薄钢片．在这上面锯出一系列长短不一的条块，靠在一个用发条带动、带有尖突的固定的滚筒边上．上紧发条以后，当发条逐渐松开时，滚筒转动，滚筒上的尖突就拨动钢条而发声．薄钢条的长短不同，可以发出不同高低的音．安排好滚筒上尖突的前后间距和左右相对位置，就可以奏出动听的音乐来．

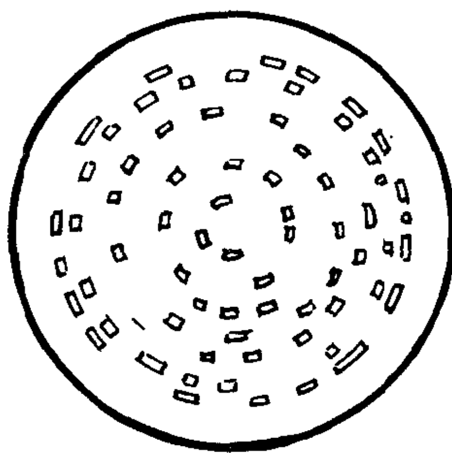


图 4-35　八音“唱片”

还有的八音琴是一张圆盘形的“唱片”——按规定挖出大小不一的孔．当“唱片”旋转时，盘上挖出的缺口就顺刻度“拨动”簧片而发音（图 4-35）．

§16 一个流动的小乐队
——手风琴的结构和表现力

手风琴是一种多簧片的簧振乐器．这种乐器源于西欧，历史不久，相传是奥地利一位名叫达米安的人于 1829 年发明的．因其轻巧而有相当丰富的音色和表现力，现已风行于欧洲、美洲、亚洲和大洋洲等地．我国于解放后大量普及，据估测，全国手风琴的拥有量已不下数百万台．

手风琴的结构简单，由簧片、键钮、风箱、变音器和传动杠杆组成．键盘式手风琴（阿考廷）的右手是同钢琴一样的键盘（图 4-36）．钮扣式手风琴（巴扬）的右手是键



图 4-36　键盘式手风琴

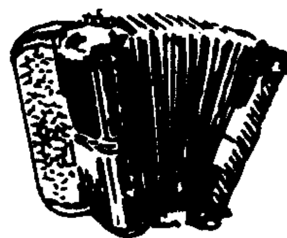


图 4-37　钮扣式手风琴(巴扬)

钮（图 4-37）．两种手风琴的左手都是键钮，因为一般多作为低音伴奏或演奏低音旋律，所以左手键钮也俗称贝司．标

准手风琴的右手有 41 键，左手有 120 个贝司. 自小到大，键数和贝司数都不相等. 下面我们将对普通手风琴进行讨论. 世界上还有有特殊结构、为特殊需要而特制的手风琴，我们将不去讨论它们.

手风琴的簧片是决定音调和音色的主要部件. 每个簧片发出一个音. 右手键分别有一排至四排簧的，左手贝司部分有一排至三排簧的. 所谓几排簧就是一个音里最多有几个簧片. 右手变音器上的⊜就是有一个高音，两个中音，一个低音簧片，共四个簧片同时发声，也叫全放音. ⊖就是只有一个高音，如此类推. 低音簧有高、中、低三排簧. 所谓变换变音器，就是换用不同组的簧片. 以四排簧为例，排列起来，共有十一种可能的组合（图 4-38）. 因此，当你看到有的手风琴的变音器上写有“长笛音色”、“提琴音色”、“黑管音色”等，都仅仅是高、低音簧片的不同组合而已，因此，其音色远远不能达到或接近所标明乐器的音色. 实际上是听什么不像什么.

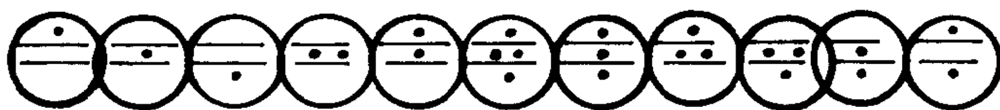


图 4-38　手风琴的变音器——四排簧的组合

手风琴左手贝司的排列如图 4-39 所示. 标准手风琴的贝司共 20 排、6 列. 每排之间是纯五度关系. 因此，只要确定一个主音，其上方就是上属音即高五度音，下方就是下属音即低五度音. 于是，在贴近的三排贝司键里就包括不论是大调还是小调的三个正三和弦〔Ⅰ级（主音上的）、Ⅳ级（下五度音上的）和Ⅴ级（上五度音上的）和弦〕. 使

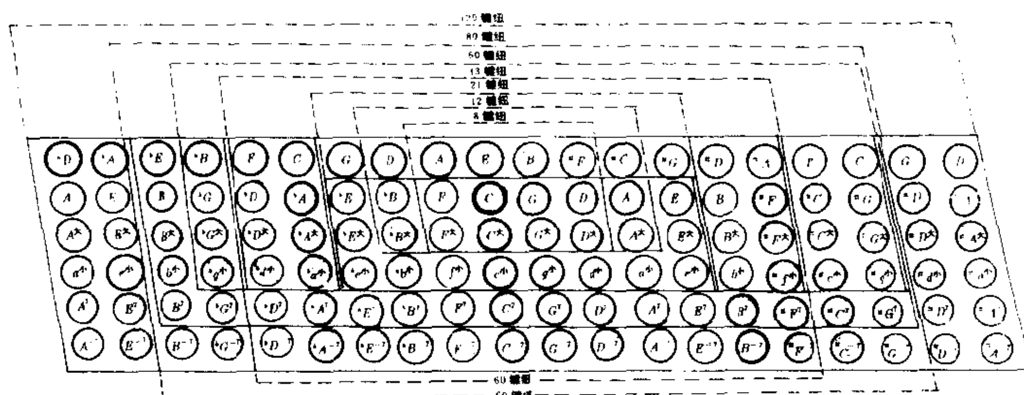


图 4-39　手风琴左手贝司的排列图

用非常方便，学习也非常简单，因为变调只需上下换个位置，不要改变指法．手风琴左手贝司的每一列中，依次是对位低音（比主音高的大三度音），低音单音（主音），主音上的大三和弦（三个音），小三和弦（三个音），大小七和弦（三个音，少五音）和减七和弦（三个音，少五音），很有规律，使用方便，音色丰富（图 4-40）．

由上面讲的手风琴左右手簧片及贝司的排列，可以看到，我们如果都用全放音，同时右手按下四个键，左手按下一个低音单音键和一个和弦键，就有 28 个簧片同时发出你所要的和弦音，音量就相当大，色彩也很丰富．如果左右手各奏单旋律，左手用低音，右手用高音，可以作对位演奏．高明的演奏家有时用右手还可以演奏双旋律，那就是三重音了．如果左手奏出节奏型的伴奏，则一台手风琴可以抵上一个口琴小乐队．

手风琴的力度、音量是由风箱控制的．可以有许多种不同的演奏风箱的方法，如短风箱演奏法——短促的来回拉、压风箱，颤风箱演奏法——把风箱作更小的颤抖等．

手风琴的右手键盘结构简单，反应灵活，而且一碰即

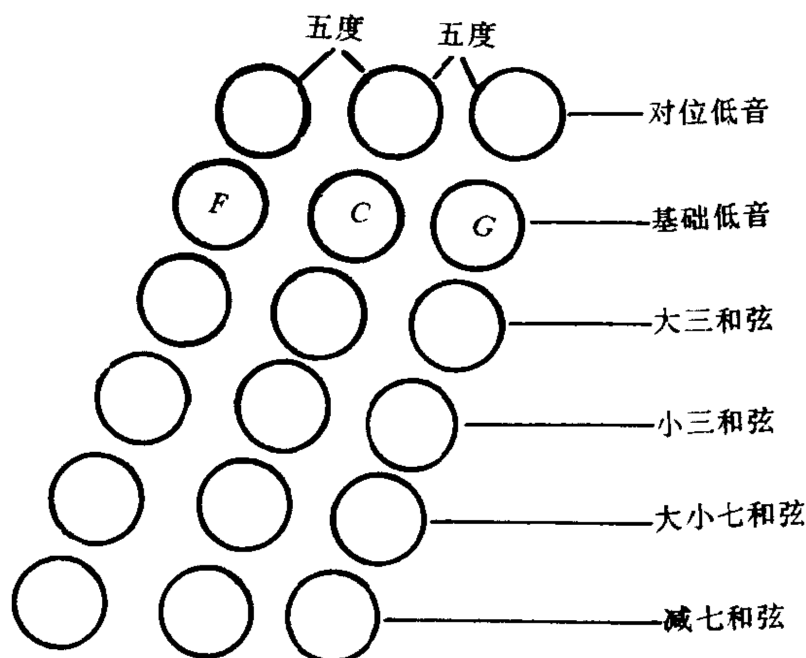


图 4-40 手风琴贝司局部

发音，可以奏出比钢琴更快速的乐曲，便于作装饰音演奏以及装饰变奏即“跑花”等. 利用右手手腕的颤动，还可以控制颤音频率，奏出特殊的小颤音效果来.

手风琴也有一些缺点，如由于都是簧片发音，音色变化不大；左右手的力度用同一个风箱控制，不能分开；左手和弦是固定的，难于去掉某一个音，如需用的是中国汉族五声调式和弦，以手风琴演奏就会“走味”；左手用的是多级杠杆控制，所以反应欠灵活；左手贝司实际上只有一组十二个音，各个和弦在一个八度里搭配，因此，不能自如地控制和弦的转位，例如 D 的大三和弦是原位 d、$^{\#}f$、a，而 A 的大三和弦就一定是 $^{\#}c$、e、a，是第一转位，G 的大三和弦总是 d、g、b，是第二转位；还有手风琴每个簧片发声能量小，传远性能差等.

虽然有以上一些不足，但就其表现力与体积、重量之

比来说，手风琴还是非常优越的．笔者建议，用两架手风琴，一个架子鼓，再加上一只小号或一把吉他，就是一个非常有表现力和特色的小乐队．要把目前流传于我国民间的手风琴利用起来，“开发”起来．

§17　金鼓齐鸣——膜、板乐器的振动模式

在香火燎绕的佛堂里，几位法师带着一群小和尚正在“唱经”，他们有的击鼓，有的撞钟，有的敲木鱼，有的对碰铃，有的使钹，有的打云锣……．这些佛教乐器都是属于膜、板打击乐器之类，现在让我们来看看它们的振动模式是怎样的．

早在19世纪初，德国物理学家克拉尼就观察到了在膜板振动时，有些地方振动幅度大，有些地方振动幅度小或甚至不动，于是画出了著名的克拉尼图（图4-41），研究表

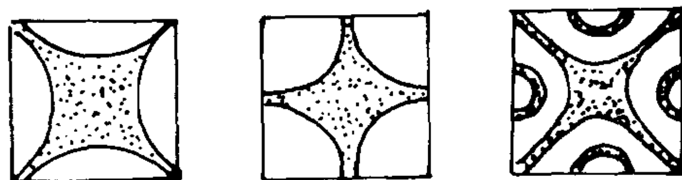


图4-41　克拉尼图

明，一面圆形皮鼓振动时，会有许多种振动模式，有各种各样的“节线”，即不动的地方，如图4-42所示．鼓越大，鼓皮越厚，鼓声就越低沉，传得也越远．当你擂起大鼓时，可以看到沙子在鼓面上“跳舞”，说明鼓皮确实是在振动．

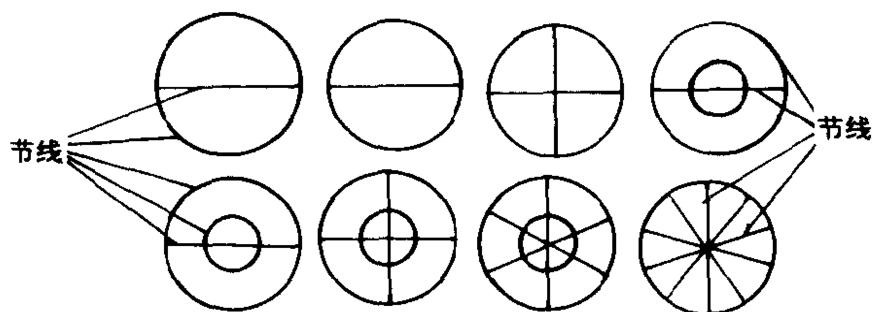


图 4-42　圆形鼓膜的振动模式

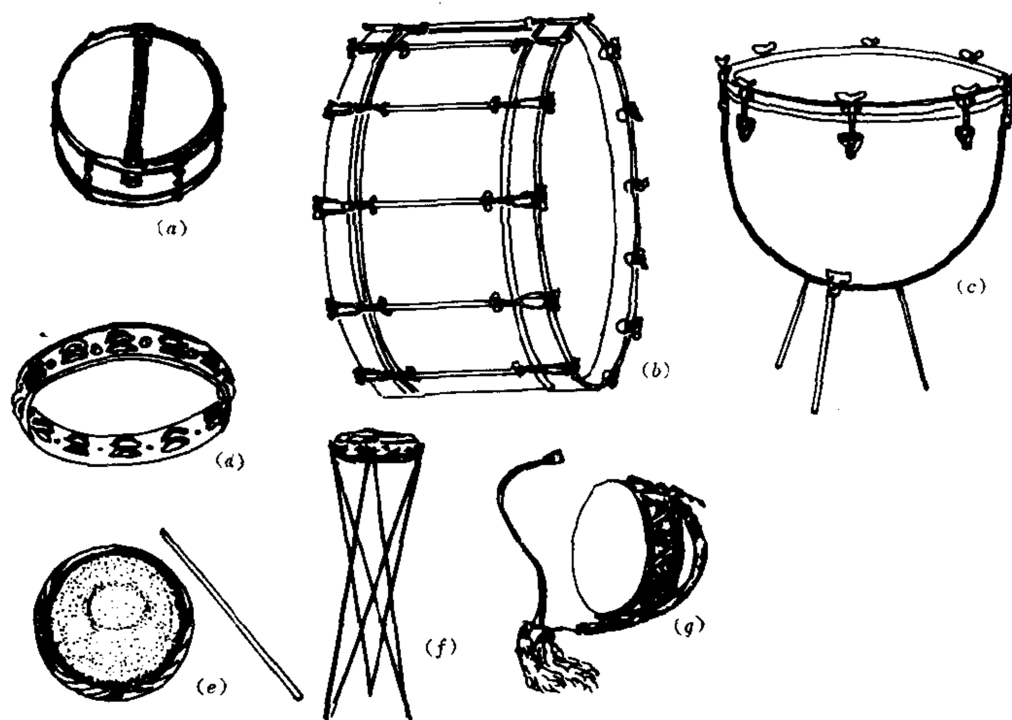


图 4-43　各种鼓

(*a*) 军鼓　(*b*) 大鼓　(*c*) 定音鼓　(*d*) 铃鼓

(*e*) 板鼓　(*f*) 书鼓　(*g*) 羌族手鼓

一般来说，鼓的振动没有一定音调，但现在管弦乐队里使用的定音鼓还是有一定音调而且是可以调节的. 一些小堂鼓实际上也有模糊的音调. 图 4-43 是各种鼓.

钟是有一定基频音调的乐器. 圆钟有一个基频，扁钟有两个基频（图 4-44），但不能再多. 整体浇铸的圆钟的振

动衰减很慢，钟声传得很远，即有“夜半钟声到客船”之说，不能作为演奏旋律的乐器来使用. 如果钟用两个半片“合瓦”而成，则可以控制衰减，做成编钟，用以奏出旋律（图 4-45).

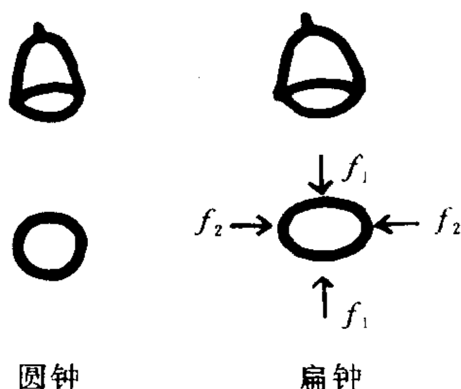


图 4-44
（a）圆钟　（b）扁钟
f_1、f_2 是两个基频

小碰铃实际上也是一口小钟. 钟振动起来，钟体不断往复变形，时而这个方向

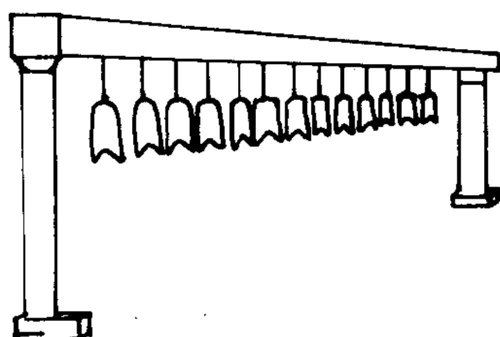


图 4-45　编钟

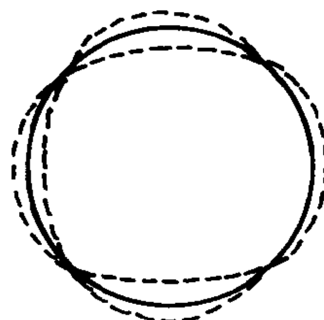


图 4-46　钟的振动

变“扁”，时而另一方向变“扁”，生出一些“角”来. 如图 4-46 所示. 当然钟的振动也有多种模式，也有“节线”(钟有一定厚度，实际上是“节面”而不是一条线). 钟口越大，钟体越厚，其音调也越低，传得也越远. 而小铃儿只能“响叮呰”.

木鱼，起先就是一段鱼形的木头，吊挂在佛殿后面，中间挖空，敲击时发出“卜、卜”声. 现在在一些寺庙里还可以看得到（图 4-47). 最常见的是小“木鱼”.

木鱼没有明显的音调，但也可以有高低音之分. 常常

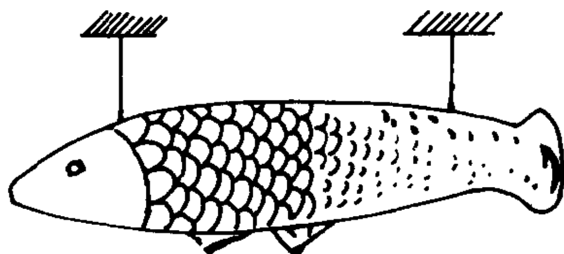


图 4-47 木"鱼"

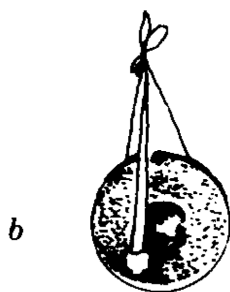


图 4-48 小"木鱼"

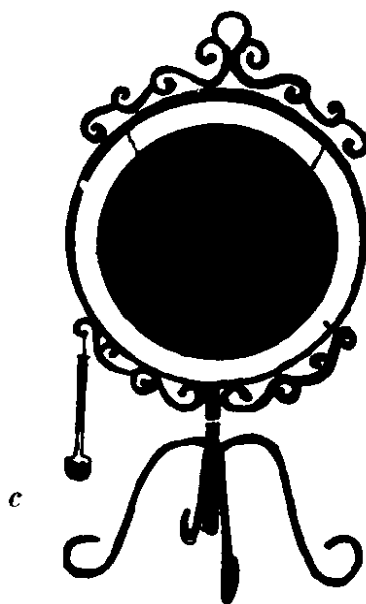
用大、小木鱼一起间隔起来敲，有节奏感. 乐队中的木鱼也是分调的. 木鱼越大，发音越低. 木鱼上挖的口实际是一个共鸣腔.



a



b



c

图 4-49 (*a*) 钗 (*b*) 钹 (*c*) 锣

钗、钹、锣都是一些没有音调的打击乐器（图 4-49），从声学角度讲，它们发出的是噪声，声谱是完全连续杂乱的(图 4-50). 锣、钗等主要是起打节奏作用，是一些体振乐器. 当然云锣也可以奏出不同音调来（图 4-51）.

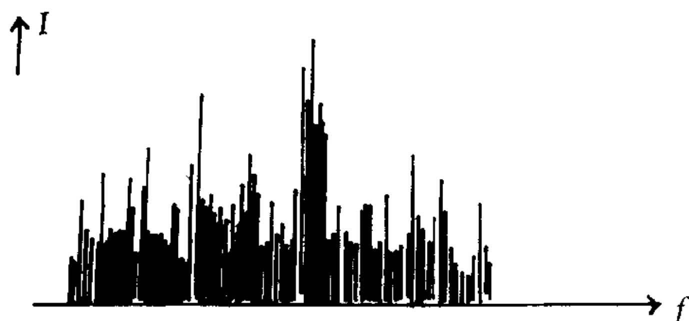


图 4-50 锣的声谱

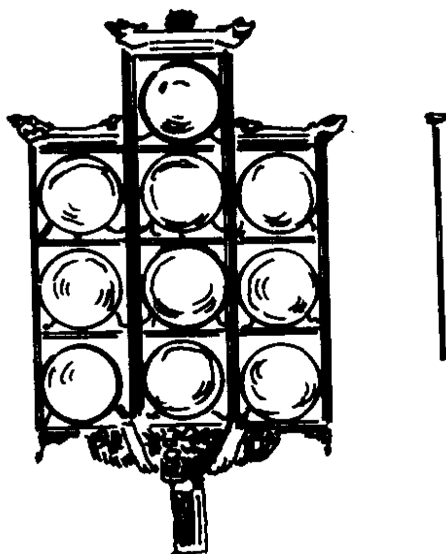


图 4-51 云锣

外国乐器中，木琴和钢片琴、马林巴琴等都是板振乐器，又通过共鸣管，放大并稳定音调（图 4-52）. 它们的材质不同，结构不同，则音色也各异. 木琴声清脆，有击木声，宜演奏快速旋律. 钢片琴、马林巴琴、铝板钟琴等音色圆润、厚泽，犹如圣洁女神从天而降. 这些琴的琴板都是两点固定的. 如图 4-53 所示. 板子越长、越薄，共鸣管越长，发出的音越低. 我国古代的“磬”也属于板振乐器（图 4-54）做成编磬，也可以奏出旋律（图 4-55）.

实际上膜板振动乐器很多，是属于原始的乐器. “击石

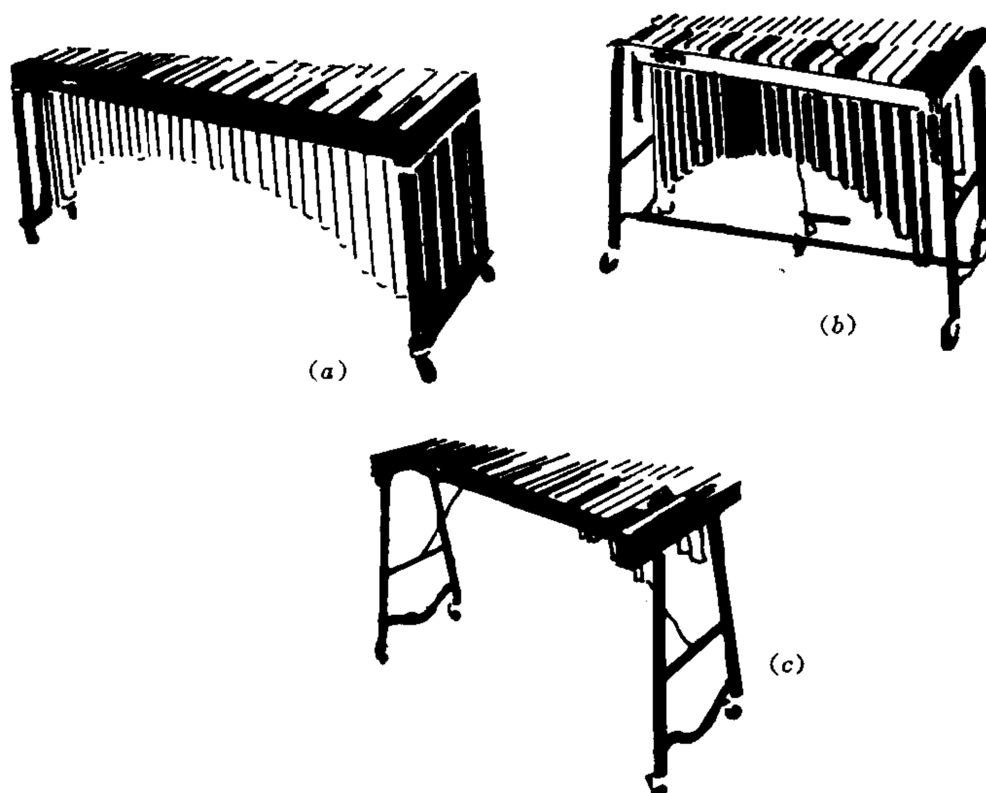
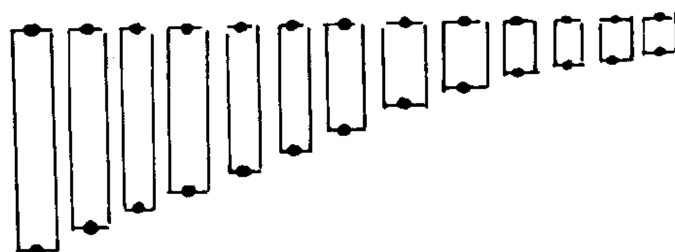
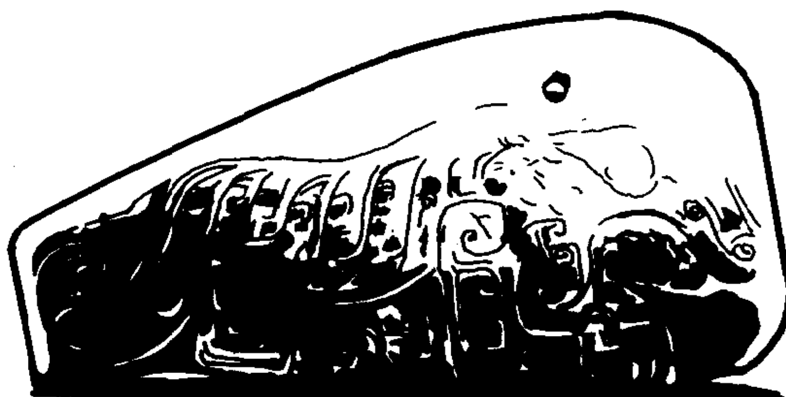


图 4-52　(*a*) 马林巴琴　(*b*) 钢片琴　(*c*) 木琴


图 4-53　钢片琴的琴板


图 4-54　我国古代的磬（晚商的虎纹石磬）

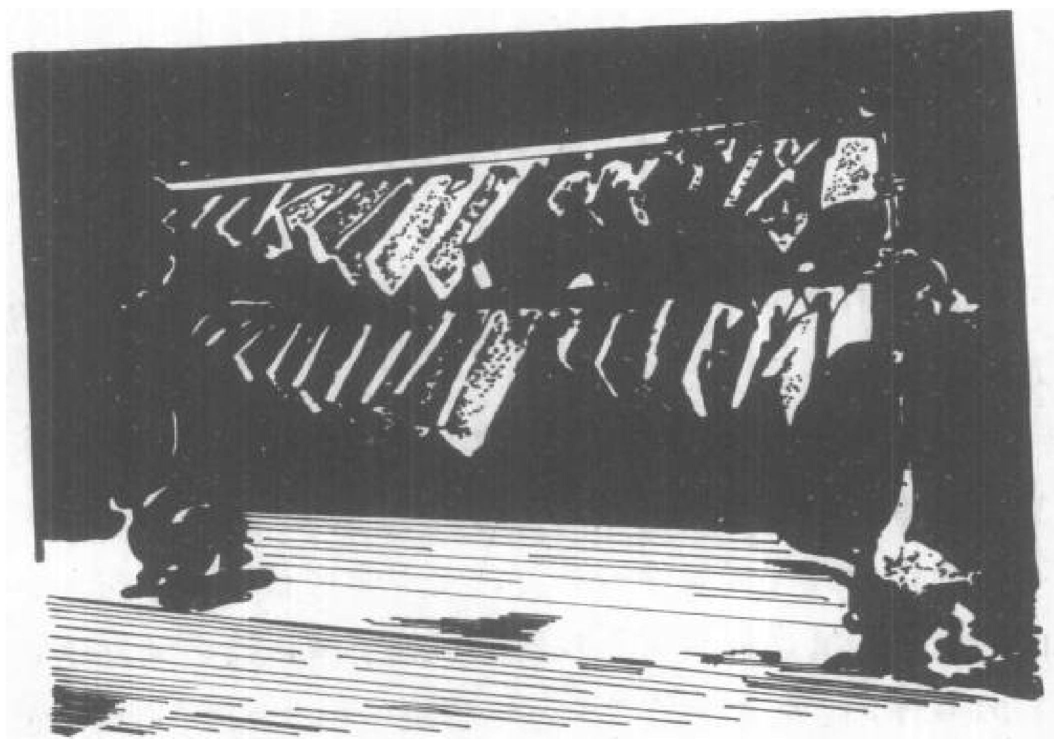


图 4-55 曾侯乙编磬

拊石”，这石就是这类乐器.世界上各民族、各地区都有各种式样的膜板振动乐器，音色也大不相同.如锯琴，是用提琴的弓去拉钢锯的边沿，靠用另一只手压锯改变其弯曲度即板长而演奏出非常柔美的旋律来（图 4-56).



图 4-56 演奏锯琴

§18 从曾侯乙编钟到当代民族乐器
——我国民族乐器与西洋乐器的比较

在我国音乐和声学发展史上，乐器的制造有很重要的地位，并曾经写下光辉的篇章.

我国早就有笛、钟、磬、琴等各种各样的乐器制作历史，知道钟发声的高低和音色与钟壁厚薄有关，弦线发声与弦的张力、气候条件等有关，发声体形状、大小与声音的强弱、传播远近有关. 我国很早就了解乐器之间发生共振的道理，比西方国家早千余年解决了用“合瓦”制钟，做出有两个基频的扁钟，解决了因钟的延时太长，不能当作旋律乐器的问题而制成了编钟等等.

1978 年，在湖北随县出土了春秋战国时期的曾侯乙编钟（公元前 435 年），这是我国古代音乐、乐器制造、冶金、声学等发展中的一个伟大的里程碑. 已经引起全世界音乐界的极大重视，其复制品已被国外收藏.

与曾侯乙编钟同时出土的还有编磬. 我们且只讲编钟，它具有以下特点：

1. 数目多，音域广. 编钟共有 64 枚，跨五个八度的的音域.

2. 从音律学上，用十二律，并用三度、五度关系. 五声、六声、七声音阶并用，各有十二个调. 说明当时已经把音律学上的成就体现在乐器制造上. 同时，编钟有两个基频.

3. 已经有标准音调. 编钟相当于现时的以^bA为标准音调.

4. 音调的计量准确度已达到很高的水平.

我国是一个文明古国，在几千年的发展过程中，有过许许多多种乐器，其中有不少流传至今，而且有着明显的特色. 如笙是能同时发出双音的、独一无二的簧管乐器. 在全世界的弹拨乐器中，琵琶的演奏技巧及表现力都独树一帜. 马头琴如歌唱般的演奏音色，唢呐、板胡的热闹劲，曲笛的淳厚味道，巴乌的柔和情调，雷琴维妙维肖的模仿能力，特别是各种锣鼓、钹、钗等中国打击乐等等，都在世界乐器之林中占有一席之地. 我国的许多地方戏曲和少数民族地区还有许多特殊的乐器.

但是，在某些方面，与西方传统乐器比较，中国的民族乐器还有一些不足之处.

一是音域窄. 如二胡是民族乐器中的主要弦乐器，一般只有二个八度多一些. 管乐器里的主要乐器笛子也只有二个半八度. 大型编钟虽然有多个八度音域，但不是实用的乐器.

二是变音少. 如一支单个的笛子，用一般指法能奏出的调很有限.

三是音量较小，特别是弦乐器.

四是低音乐器少，传统的弦乐器和管乐器中没有低音乐器.

还有一点是一般民族乐器的音准差，如竹管靠自然生长，规格不一样，加工全靠经验，少量制作还可以，批量生产音准就不行了.

民族乐器的音色比较单薄，欠圆润，有的如唢呐、板胡等则个性太强，合奏效果不好. 常常有这种情况，一个大的民族乐队合奏，诸多乐器本来有的就不准，笛子越吹越高，胡琴越拉越低，就显得杂乱.

此外，中国的民族乐器中还没有铜管乐器.

因此，对我国的民族乐器，一方面要保持其民族特色，另外，也还有进一步改革的必要.

第五章
音乐电声

§1 我们周围的电声世界
——音乐电声中的物理问题

我们在日常生活中所能听到的音乐，有人的歌唱或乐器的直接演奏，然而更多的是收听广播电台里播放的音乐节目或戏曲节目，收看电视台播放的带有音乐的节目，自己放送录音磁带、唱片、录像带、激光唱片、激光视盘、高密度视盘以及在看电影时听到电影中的音乐，在餐馆、咖啡厅或舞厅里的伴奏音乐，各种环境中的背景音乐，“卡拉OK”带中的音乐伴奏等等. 而这些都是电声音乐. 即使是电吉它、电子琴或计算机奏出的音乐也是电声音乐. 因此，在现今社会里，音乐电声在我们所涉及的音乐生活中占了绝大部分的比重.

所谓音乐电声，是指基于有关电学以及无线电电子学的基础上产生并得以应用的音乐声. 具体说来有以下几个方面：

一是电声源. 用电振荡产生不同频率的振动，如电子琴、电子合成器等，然后经过电-声换能，变成机械波，传

入耳中.

二是换能，包括两个方面，一是扩音系统或“卡拉OK”用的传声器（俗称麦克风）及电唱机中的唱头等都是由声的振动即机械振动变成电振动．另一方面，所有的电声放音系统如唱机、收音机、录音机、影视伴音、电子琴等等，最后总是要变成机械声波让人耳听到，因此，不论是音箱、扬声器还是耳机，无非都是把电振动转换成机械振动.

三是调制．广义地说，就是声音信号变成电信号以后的加工，包括信号放大．这是所有放音系统都有的，还有调频、调幅、混频、滤波、组合音响中的均衡、降噪、人工混响、人工延时、响度控制等等.

在进入电时代后的开始期间，电的应用还仅仅在于通讯和作为能源等．但到了现今世界，情况就不同了．电子技术的一个很大的应用方面，并且也是同普通人们生活最密切相关的领域之一，就是音乐电声了.

音乐电声不仅包含着电学、电子学技术，渗入了计算机技术，而且与激光、影视、信息控制、仿生学、心理学等许多新的科学技术部门都有着广泛的渗透和联系，已经发展成为一门综合科学与艺术的学科．音乐电声中的物理问题也已涉及物理学的许多分支，图 5-1 展示音乐电声的诸多方面.

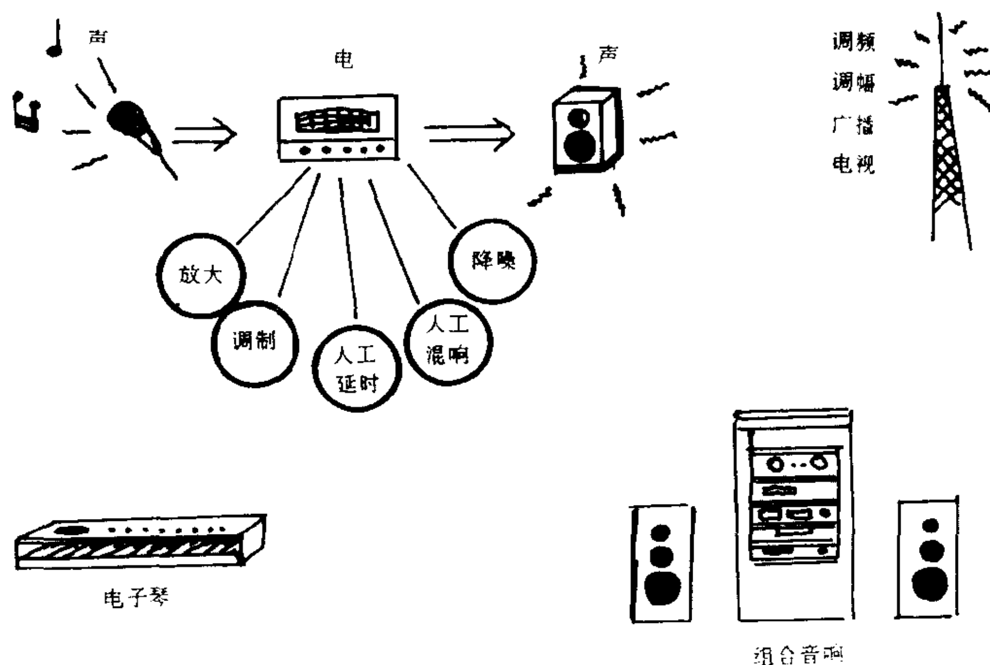


图 5-1　音乐电声的世界

§2　谈谈麦克风——传声器的类型和使用

对于我国一般中年人来说，可能他首先是从开大会，报告人讲话时见到传声器（俗称“麦克风”）的．对年轻人来说，就可能是先在电视节目中，在相声演员前面或节目主持人、歌星的手中看到传声器的．实际上，在我们家里每一台收录机上．每一台电话机里都有“麦克风”，唱“卡拉OK”当然就更离不开了．

传声器的俗名又称话筒，在不同场合还叫拾音器，或叫送话器等．凡是要把真实的声音传入电声系统，或者把声音贮存起来即录音时，都必须用到它．对传声器的基本

要求是能够及时传声而且不失真.

最初的传声器用于电话，是一种碳电阻型的（图 5-2）. 当受话器的振膜被声音激发起振时，就改变了振膜后面的碳粒与接收电极之间的电阻，从而电路中的电流也改变了，于是通过变压器输出的电压与声音有了同步的振动，实现声能到电能的转换. 这种传声器制作容易，价格很低，但是不稳定，杂音高，频带窄，频响差，一般 300 赫兹以下的声音已有很大衰减，因此失真很大. 你可能会有以下的实际体会：一个熟人第一次给你打电话时，你常常会听不出他是谁，而后来你熟悉了他在电话里的声音，是你自己在脑子里重新建立了他的声音在电话里的音色. 在电话里传送音乐，也只能听出是个什么旋律而已.

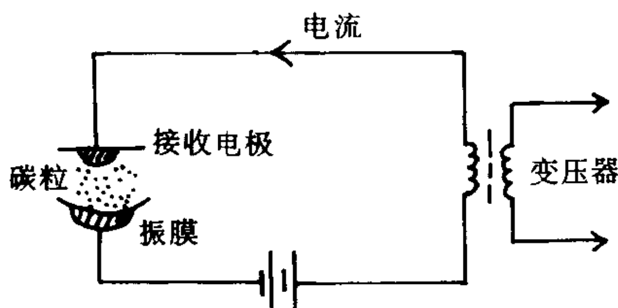


图 5-2　碳电阻型话筒原理

后来，发展了电容型、动圈型、电动型和压电型等传声器（图 5-3）. 电容型和动圈型传声器多用于高级拾音场合，它们是基于用声音带动电容或磁场中的线圈变化来调制电压的，它们的灵敏度高，频响好，稳定性高，噪声低，但是比较“娇气”，价钱也贵. 在便携式收录机上用得多是压电型的传声器. 它的体积小，价格便宜，但是性能较差. 因此，用家用便携式收录机录音乐，仅就传声器失真这一点，声音的质量也是好不了的.

传声器有指向性，有的是“全向型”的，即可均匀地拾取来自各个方向的声音. 舞台上中央上方的悬吊式传声

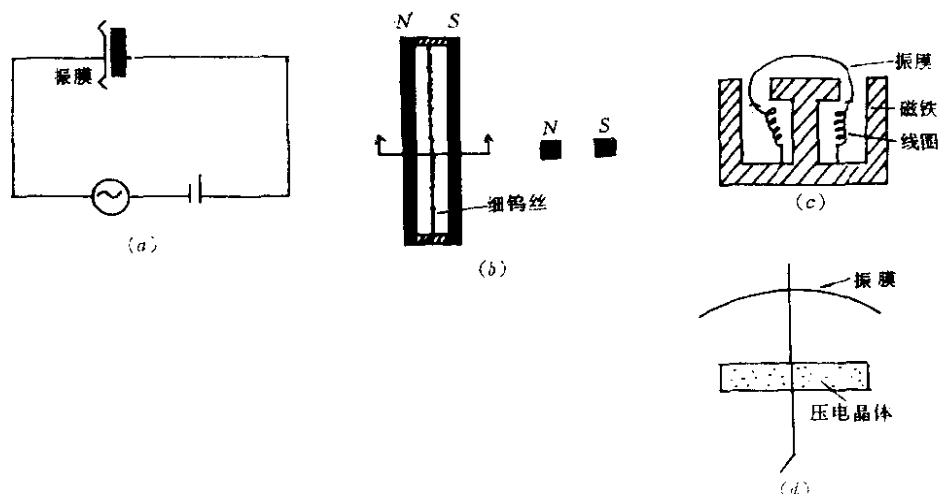
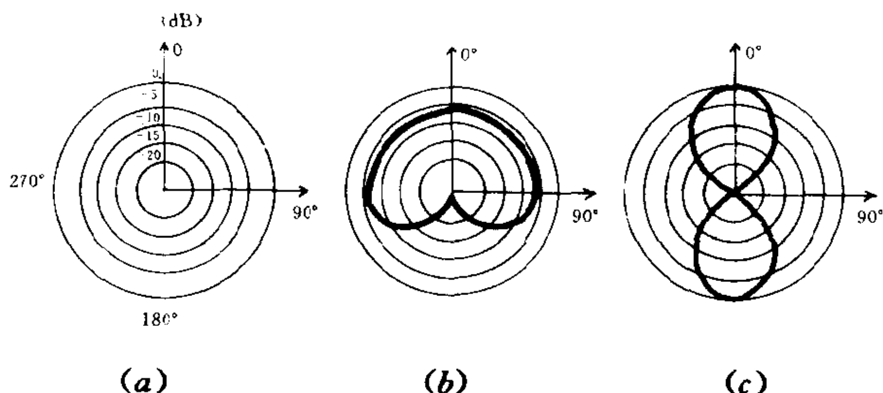


图 5-3 各种传声器

(*a*) 电容型 (*b*) 电动型 (*c*) 动圈型 (*d*) 压电型

器就是全向型的. 电视台的演播室里, 有一些长长的棍状的话筒从老远对着演员, 就是一种"心型"传声器. 足球实况转播时听到的踢球声, 也只能是从远处录下的. 这种指向性强的话筒也可以用于乐队集体录音, 每件乐器用一个,旁边声音进入得很少. 它可以压制不希望有的噪声、混响声等. 当然, 如果是面对面的会谈录音, 则用"8"字型的传声器了 (图 5-4). 还常常可以把各种类的传声器组合起来使用.



(*a*) (*b*) (*c*)

图 5-4 各种指向类型的麦克风

(*a*) 全向型 (*b*) 心型 (*c*)"8"字型

要会使用传声器. 首先是根据不同用途选用. 一般录

音、扩音用单点传声器，为录制立体声用立体声传声器. 为耳机听音而录制时用人工头传声器. 拾取远处声响用具有抛物面的传声器.

注意把传声器放在适当的位置和距离，太近或太远都不好. 各种乐器使用传声器都有最佳位置和距离，并不是把传声器放得越近越好. 例如：小提琴独奏时，把传声器放得很近，听起来犹如一架巨型乐器. 录制钢琴的声音，要把传声器放在后面（立式钢琴）或下面（大钢琴），离琴板适当距离较好. 如果把传声器放到钢琴的盖板口、琴弦旁，听到的只能是比较粗糙的声音.

有的传声器适应于近距离使用，如通俗歌唱演员用的话筒上有一个很大的海绵体，可以把接近效应如低频的“嚓嚓”声等吸收掉一部分，但又保持着很高的灵敏度，能反应出演唱者声音细微的变化（图 5-5）.

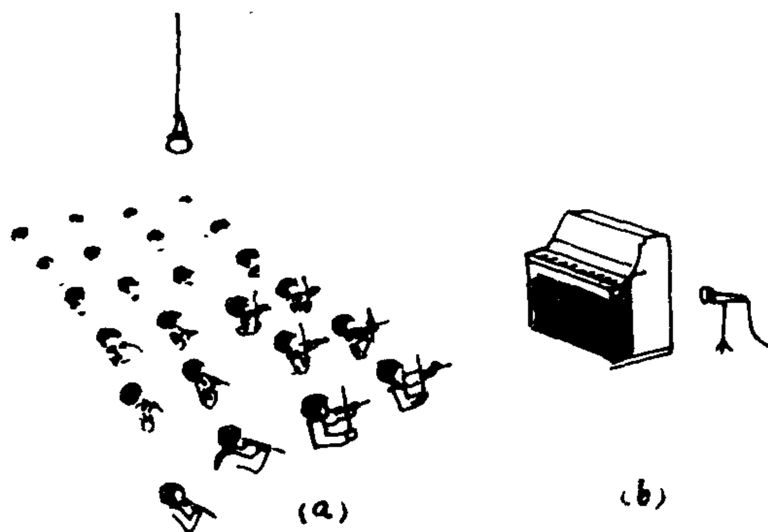


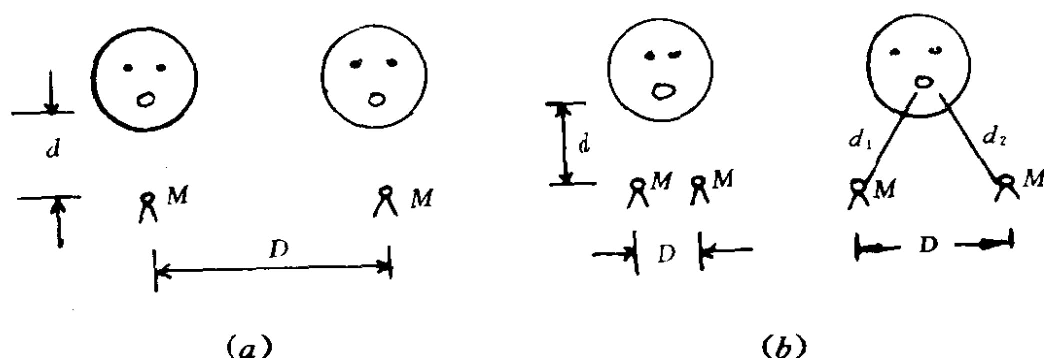
图 5-5 传声器安放的位置

(*a*)“悬吊式”，吊在乐队上方　(*b*) 立式钢琴放在琴板后面

几个人使用一个或一个人使用几个传声器时，尤其要注意安放的位置. 如果放置不当，就会产生各个传声器所

拾取的声音之间的位相（或时间）差．当然，有时还要利用这点，使较少的人唱歌或乐器演奏好像是一个很大的队伍等（图 5-6）．

传声器还有“个性”．要用好传声器，更多的还要靠现场经验．



(*a*)　　　　(*b*)

图 5-6　传声器放置位置示意

(*a*)两人用两个传声器　$D \gg d$

(*b*)一人用两个传声器　$d \gg D, D \approx d$ 不好

图中 M 是传声器，d 是人与传声器的距离，D 是两个传声器间距离．

§3　为什么音乐节目常常用调频台播送——调频广播与调幅广播

我们周围的天空里散布着无数各式各样的电波：广播的、通讯的、民用的、军事的，波长长的、波长短的、调幅的、调频的……等等．我们知道，我们的广播中和电视中所听到的音乐，是把音频信号“荷载”在高频电波上．广播电台或电视台发射台播出节目时，发射的是电磁波，我们的收音机、电视机接收的也是电磁波，把电磁波接收到以后，再设法把上面的“荷载”捡出来，然后通过扬声器

送到我们的耳朵里.

声音信号怎样“荷载”在电磁波上呢？我们知道，电台或电视台发射的电磁波的频率是很高的，达到几百千赫或几十兆赫甚至更高些，而声频的信号频率只有几百赫到几千赫. 即使包括谐波，相对来说还是比较低的，于是，把声音频率附加在承载的电磁波上，使承载波的振幅随着附加上去的声音信号而变化. 然后，整个电磁波讯号被接收后，用滤波器把高频信号滤掉，只留下声频信号，这就是“调幅波”. 这种调制方式已经沿用了许多年.

随着科学技术的发展，又发明了把声音频率去调制承载波的频率，电磁波被发射并被接受后，再解调，这就是“调频波”.

调频广播与调幅广播比有许多优点：信噪比高；失真小，即保真度高；抗干扰力强；频率响应宽，即从很低的声频到很高的声频都有效；动态范围广，即强弱变化幅度很大. 现在的收音机，一般都有接收调频波的部分. 音乐节目常常是调频广播节目的主要内容. 如中央人民广播电台专门有调频台播放轻音乐.

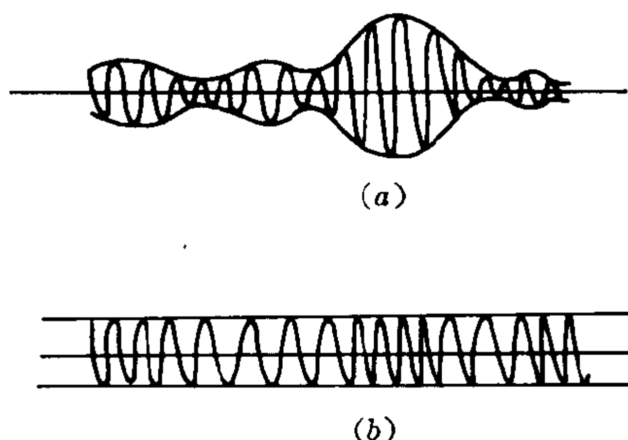


图 5-7

调频广播还有一个优点是便于利用立体声，因此，立体声广播节目只在调频广播中，即称为调频立体声广播，而不见“调幅立体声”广播（图 5-7). 北京人民广播电台从

1993年3月1日起昼夜24小时用94.5MHz的频率播送调频立体声音乐（现改为97.4MHz）.

§4 歌声是如何从收录机的磁带中跑出来的——磁带录音机和磁带

把声音记录下来又重新提取的方法，除了机械唱片以外，还有磁的和光的方法.

利用磁性记录声音，最初使用的是钢丝录音，即所谓钢丝录音机. 后来才发展成磁带记录. 早期的磁带录音机是用较宽、较厚的开盘磁带，机子也很大、很重. 现在，只有精密的高保真度的记录，需制作母带时，还用大“开盘机”. 后来，发展了盒式录音机，录音机才大量推广、普及，进入普通老百姓的家庭，并不断向小型化发展. 磁迹式的录音机可以反复播放，有其独特的功能. 把声音记录在磁盘上的方式现在也已经发展起来. 数字录音技术除了使用磁盘和光盘外，许多也是记录在磁带上的.

用磁带或钢丝录音都是基于：在磁性材料记录下的信号，当把外磁场去掉后还有“剩磁”存在的这个性能. 然后，记录有磁信号的磁带或钢丝，通过放音磁头的隙缝，改变了隙缝处的磁场，于是，造

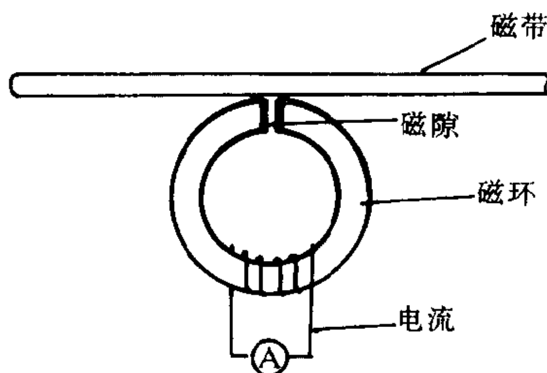


图5-8　磁带录放音原理

成磁铁中磁通的改变，在线圈中形成的信号与记录在磁带上的信号相同，再放大并转换成声音．这就是用磁带录放声音的基本原理和过程（图 5-8）．

由于磁性材料上的剩磁是可以消除的，所以录音磁带可以多次反复使用，很是方便．

录音、放音、消音都是通过磁头实现的，由于录放音磁头的隙缝总是要有一定宽度，所以，我们听到的是在一段距离里的平均效果，对于太高的频率，就无法分辨，因此，磁带录音的局限在于其频响不是很好，而且不能无限提高．最好的录音磁带也只能记录到 15 千赫左右的声音，一般只有 8—10 千赫．

不同的作用功能对磁头的要求是不同的．录音磁头要提高效率，就要叠置几个；放音磁头要提高灵敏度和分辨性，就要使缝隙尽量小；而消音磁头要消音效率好，则要用大些的缝隙．因此，原则上应该用不同的磁头处理录、放、消音．从此也可以预见到，如果是集录、放、消为一体的磁头，其音响效果肯定是会受影响的．

磁带录音机所用的磁带也有高低之别，常见的普通带（TYPE—I）在带基上涂的是 γ—Fe_2O_3 磁粉，价低，动态范围不大，频响不大于 10 千赫，高频性能不好．涂 CrO_2 的叫铬带．（TYPE－Ⅱ），高频性能及动态性能都有改善，适用于音乐录音．还有一种在普通带基上涂 Co－γ－Fe_2O_3 粉层的钴带（TYPE－Ⅲ），信噪比和高频性能可与铬带相比，价格便宜，磁头磨损比铬带小．铁铬带也是一种常见带．金属带（TYPE－Ⅳ）的记录密度高，高频性能好，动态范围大，是目前最好的一种磁带．

各种磁头要选择使用各种不同的录音带，以免磁头被磨损. 劣质磁带或过于陈旧的磁带，磁粉会脱落，将影响录音质量并会损坏磁头.

磁带录音机要求很稳定的线速度，可以用单电机、双电机或三电机分别或合并操作前进、后退及快进、快退. 录音机要尽量减少机械抖晃，能迅速起动、倒带. 还要减少失真，提高信噪比，避免左右声道的串音等. 当然，录音机质量还是集中到保真度和有好的音质上.

§5 原始的声音记录方法和第二代唱机——机械刻纹唱片和电唱机

几十年来，电唱机一直是音乐爱好者所必备的. 电唱机系统是用普通的机械刻纹唱片，经重放后通过电声系统放音的，它包括唱片、唱机以及扩音系统等几个部分.

自从 1871 年爱迪生第一次记录下“玛丽有只小羊羔”这一句历史性的言语后，留声机——第一代唱机就一直没有离开过音乐. 但多少年来，仅仅能在近距离、当场听取. 第二代唱机——电唱机的出现使音乐的扩声和广播成为现实. 后来，发明了立体声唱片，慢转密纹唱片. 唱片的录刻技术、质量、容量得到了不断的改进. 因此，虽然当前机械唱片受到磁带录音和第三代唱机——激光唱机和激光唱片的极大冲击，但是由于历史的积累，现今仍有不计其数的唱片和设备保留在千家万户. 所积累下的许多各个时期的音乐资料，不可能一一输入光盘. 即使是目前的激光

唱片，由于其 20 千赫以上的性能也还欠佳等原因，机械刻纹唱片和电唱机还是常规的音乐源之一.

一台电唱机是由唱头、唱头座、拾音臂、唱片盘等组成的. 唱头就是一个拾音器和换能器，把机械振动变成电信号. 唱头上有唱针，目前一般电唱机的唱针是半永久性的，一般用硬质金刚石制作，不易磨损. 高级唱针的针尖不用圆形，而是椭圆形的，以减少播放时失真. 唱头要紧固在唱头座上，其结构、重量对放音质量影响很大. 唱头要给唱针以针压，因此要有合适的重量和结构强度，以免发生自振. 拾音臂用以支持唱头座，使其轻巧、平滑、灵活地运动，保持唱针永远沿着槽沟运动. 唱片盘是用电机带动旋转的. 要求唱针的线速度均匀、稳定、不抖晃、不振动（图 5-9）.

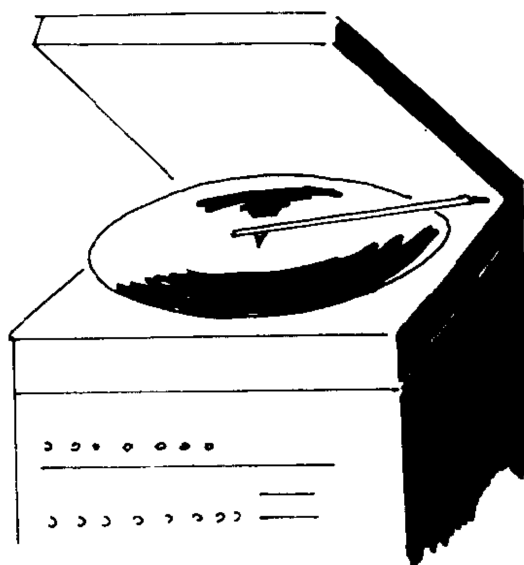


图 5-9 电唱机

电唱机是一件很精密、灵巧的仪器，我国迄今还不能生产高质量的电唱机. 如果你在播放唱片时看到唱片有周期性的上下位移，或者听到过多的“沙沙”噪声以至出现跳针等等，那就是电唱机或唱片的质量出了问题，或是唱针磨损，针压不够等造成的后果.

至于从电唱机上播放出来的音乐如何加工、调整以及如何放音，那就是组合音响其他部分的工作了.

§6 激光和数字的时代
——激光唱片的优点

这几年，激光唱片时兴起来了．中央人民广播电台的调频立体声节目里专有“激光唱片欣赏”这一栏目．高级的组合音响中也有激光唱机的位置．激光视碟也已开始进入一般家庭．“卡拉OK”也用了激光视碟，就兼有了声像．最近发展的一种小型的、边长不到15厘米的薄薄的便携式激光唱机，更是一些年轻人跨在腰上的“时髦”的“装饰”（图5-10）．



图5-10 小型激光唱机

激光唱片的工作原理大体上是把唱片面根据声音信号不同，做成不同形状、角度的反射面．激光束照射在旋转的唱片上，接收其反射信号，根据其强弱不同的信息，重放出声音来．图5-11表示激光唱片放声原理．

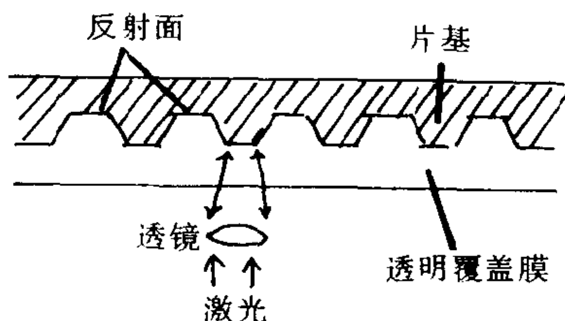


图5-11 激光唱片的构造及放声原理

激光唱机比起传统的唱机，即留声机和电唱机来说，到底有哪些优点呢？

一是保真度高，因为采用的是数字录音，其采样频率较高，一般在44千赫兹以上，所以失真小．

二是信噪比高．这也是采用数字录音的效果．

三是寻索方便．因为用的是激光束照射唱片，可以跳跃地寻索，不必像磁带那样必须顺序寻索．倒片也方便，是瞬间的事，可以直接跳到你所要的位置，任意重复播放或按记录指令规定的程序播放．

四是由于不用机械唱针，没有机械接触，可以采用浮动式驱动机构，避免了机械抖晃，这当然也增加了保真度．

五是纪录密度高．一张直径为 30 厘米的激光视盘可以记录几千幅图像和 16 小时音乐，目前市场上的一张直径为 11 厘米的激光唱片可以记录 70—80 分钟的音乐．

六是寿命长．因为用的是光信号，唱片表面用一种特殊的透明树脂覆盖，于是信号面被保护了起来，不被划伤，不受灰尘的影响．因此，理论上激光唱片是不会磨损的，可以无限次使用．

最后是成本低．唱片材料价格不高，而且目前已掌握了激光唱片的大规模复制技术，可以大量生产．所以目前激光唱片的价格已经逐步下降，已趋于同普通唱片或录音磁带接近或可相比的价格．目前激光唱片的价格较高，主要是生产技术要求较高，一次性投入较大．就现在的技术，还难以把过去保存在机械唱片上或磁盘、磁带上的资料全部转入激光唱盘．可以预见，一定时期以后，机械唱盘就将基本上成为历史的遗物了．

当然，目前激光唱片还有一些缺点，主要是不能像磁带那样重复录音，这方面的技术最近虽有突破，但还不能普及．还有，第一代激光唱片的采样频率还不够高，22 千赫兹以上的高次谐波无法录入，这会影响录音的保真度．因

为前面已讲过，据实验，并也已被公认，人耳听阈 20 千赫以上的谐波虽然直接听不到，但对音色有影响．要改变整个一套激光唱机的生产和录放音技术规范体制，目前已有产品了．再有，现时激光唱片的成本还偏高一些．但是可以肯定，激光唱片像录音磁带那样大量普及是为时不远了．

激光唱片是数码录音的一种形式．目前已发展的数码录音磁带（DAT）、（DCC），以及直录技术也将是取代普通录音带的一个趋势．

§7 音乐的立体感
——双耳效应和"声像"

人们的感官对周围世界的感知是立体的，这一点无论是视觉、听觉、触觉、嗅觉等都是这样．人们可以看到、听到、闻到、摸到前后左右上下来自不同方向的信息．但是，究竟是什么原因可以使你能辨别出方向的呢？

对于视觉来说，有一个著名的，谁都可以做的实验：闭上一只眼睛，把双手平举在你面前．左右手都握拳而仅仅伸出一个食指，两个食指相对而放，保持约 40～50 厘米的距离．然后，左手向右、右手向左相对移动，企图使这两个指尖碰上．实验的结果是，在大多数情况下，这两只手的手指会一前一后的错过而碰不上．但是，如果你睁开双眼，那做到使两个手指相碰就太容易了．这说明视觉的立体感是靠"双眼效应"得到的．

同样，听觉的立体感是基于"双耳效应"．现在，"立

体声广播"，"立体声唱片"，"立体声录音磁带"，"立体声耳机"等等，我们已经听得多，见得也多了．这都是利用从某一个声源发出的声音，传到人的耳朵里时，如果声源不在正前方，则声音到达左、右耳的时间及强弱会有一定的差别，这种差别被人耳接收就能"分析"出声源在什么方向和位置（图 5-12）．

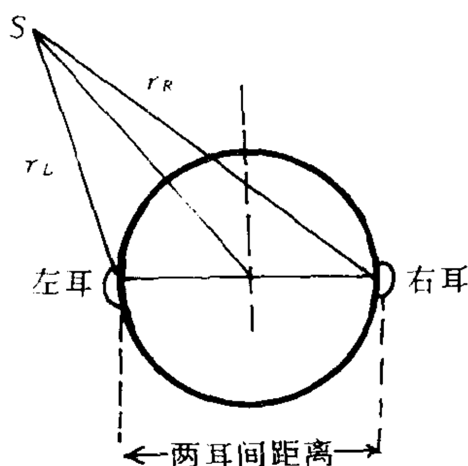


图 5-12　声源到达左、右两耳的差别
S—声源　r_L、r_R—声源到达左、右两耳的距离

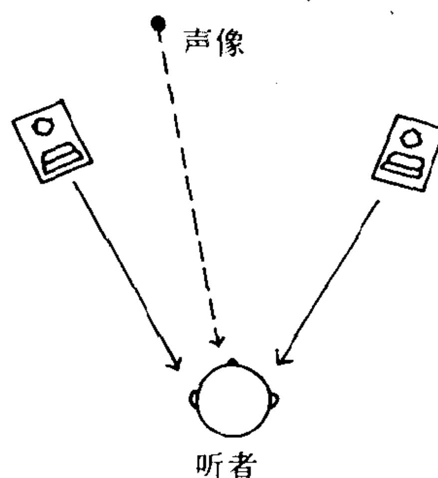


图 5-13　声像

利用这种"双耳效应"，我们通过录音技术录下声响，然后用两个或几个音箱播放出来，使人们听起来好像音箱之间有一个声源在发声．这个假想的、实际上不存在的声源就叫作"声像"（图 5-13）．当我们听立体声广播、立体声唱片中的一个管弦乐队演奏时，你可以感到大提琴在你的右前方，小提琴在你的左前方，而小号却在中间……．对于电声乐队，你也可以很明显地感觉出主奏乐器来自不同的方向．听重唱，你可以清楚地分辨出左、右声道中分别播出的各自的高声部和低声部．因此，立体声的优点不仅仅是有真实感、临场感、空间感，而且由于把声像分离了或改变

了位置，就会使你听觉具有层次感，而且可以压低噪声.

环绕立体声用的不仅是一对音箱.把一些音箱放在房内各处，就有从各处发出声音的效果.你还可以用“声像移动”技术，使听众听起来好像有某种声音如脚步声在你前方从左向右或从右向左的移动.

要有立体声效果，必须是至少有两个音箱或耳机放音.不然，尽管你的录音是立体声的，但是，如果放声的点只有一个，那是怎么也得不到立体声效果的. 我们常见的一种手提式立体声录放机，两边的扬声器离得很近，人距离机子要很近时，这两个扬声器发出的声音才可以有立体声感觉（图 5—14）.

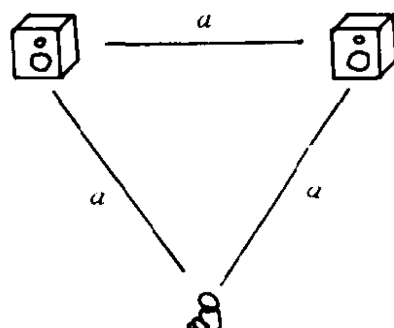


图 5-14　有立体声效果时，人与音箱的最佳距离

当然，如果你录制的磁带，你的唱片或你收听的广播系统不是采用立体声技术的话，那么不管你是多少个扬声器放音，还是出不了立体声效果.立体声有双声道、四声道或更多声道等，无非就是在“磁轨”或“光轨”上分开左、右声道或多声道，有两条或多条磁迹或光迹记录和放音而已.

立体声采取专门的录音方式，如把两个拾音器正交重叠放置，则可以收到同一声源发出的不同强度的信号，把两个拾音器并放排列，可以收到有时间差别的信号，还有“拟人工头”话筒，模拟一个人的头，在两耳处放拾音器，这是专门为立体声耳机录音的.

至于有一种“假立体声”，则是利用电子学或声学的方

法，把单声道的信号利用声音的强度差、时间差或位相差，使人产生听觉的假象，似乎有立体声的感觉. 例如把扬声器放在靠墙角，于是低音绕过来，与高音直接反射过来有差别，产生立体感. 又如，对于乐队中不同乐器把扬声器安放在不同位置上，使听到的声音有先后，产生立体感. 再如，利用两个扬声器放音，人为的制造位相差，产生立体感等等.

总而言之，不管是“真”立体声也好，“假”立体声也好，都是一种声音的听觉效应.

§8 Hi-Fi——电声音响系统的高保真度

电声音响系统的高保真，有人也俗称“海-非”（Hi-Fi）是英文 High Fidelity 的缩写.

自从电声音响问世以来，就一直面临着两个主要问题：一是如何减少失真，即声音原本是怎样，经过电声系统传播或放大，还能维持原样，这就是保真度，这里面有时也包括了抑制和避免噪声；二是如何使音乐通过电声系统后还能有所改善，即对声音的控制和加工问题. 当然，保真度是首先的，能够保真了，再进一步的加工才有了基础.

随着音乐在电声中越来越重要的同时，对于电声传播中的保真度问题就越来越突出了. 因为，如果只是打个电话，用个扩音器，把讲话的声音放大，只要能听得清楚就算达到了要求. 至于音色改变了些，高低频被“切”去了

些，那都不会被人注意，而且也对听的效果无妨. 然而，对于音乐来说，这种要求就不够了. 它要求频响宽，即对不同频率的音乐都能有同样的放大倍数，以免失真；对于很高次的谐波，虽然单独听不到，在音乐中还是起着能够影响音色的作用的，也要如实放大，才不失真. 还要求噪声低，动态范围大，音质优美，有身历其境的感觉等等，也就是所谓“高保真度”了. 从历史上看，高保真度的提出，也是从本世纪 50 年代研究密纹唱片开始的.

什么是“高保真度”的含义呢？广义地说，就是声音通过不管什么方式的录音、存贮或传递，重放出来要与原本的声音高度相似，保持着原来声音的各种基本特性；狭义地说，就是指从电声系统中的音源（包括唱片、磁带等），在重放中的保真度. 当然，“高保真度”是相对的，是一个相对接近的概念，不可能作到“绝对”保真.

把上述“高保真度”的要求具体化，则大体有以下几个方面：

一是重放声在各个频段的成分与原来的声音相同，即频谱特性相同；

二是没有新加入的噪声；

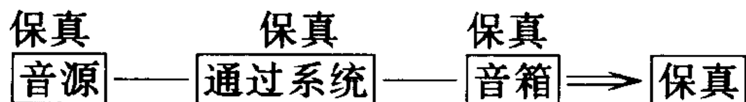
三是重放声的响度和动态，可以与原声相比；

四是重现原声的空间特性；

五是重放声保存有原声的混响特性.

由此可见如要保持“高保真度”，则对音源、声响通过系统以及放声系统这三者都要“高保真”才行. 三个环节中哪一个环节差了，都不能达到“高保真度”. 如果你的磁带或唱片不好，或是用的劣质唱机，则后面的系统再好也

保不了真．同样，好的磁带在低质录放机上放音，照样得不到好效果．还有，扬声器质量不高，再好的音乐也放不出原本的水平．因此，Hi-Fi——高保真度是一个与总体系统的相关问题．



可以有许多技术措施来保证达到高保真度，其中还包括把录音条件和录音环境做得和放音条件和放声环境相同，如人工头录音；使重放房间同录音室一样，把录音电平选择得同放声电平一样等．

到底绝对的“高保真”好不好呢？这也是一个有争论的问题．唱歌时录入人的呼吸声或换气声，演奏时录入一定的击键声，表演时录入一定的效果声，乐队演出时录入一定的空间反射声，可能会增加真实感和临场感．包括噪声也是那样，完全把噪声去掉，也会有感到“寂静”的味道．因此，掌握了“保真”以后，同时而来的是“加工”问题，但“保真”无论如何是第一步的，是加工的基础．

§9　从“杜比”说起——音乐电声中的降噪问题

经常有人问起，你的组合音响系统中有没有“杜比”．这就涉及了降噪问题．在音乐电声系统中，或者是在处理“高保真度”问题时，降低噪声是中心问题之一．在这里，我们把不需要的所有声响都叫做噪声．

音乐系统中的噪声来自各个环节：唱片和磁带在录音时会带入噪声；电声系统本身会有交流噪声；磁带存放时会带来“复印”噪声；播放时会有磨擦噪声和机械振动噪声；重录时由于消磁不净会带入噪声；重放立体声还有左右声道通道分离度不佳带入的噪声；接收广播时会有高频噪声等等. 图 5-15 表示电声系统中的一些噪声来源.

所谓降噪问题，除了降低噪声的绝对强度以外，主要的是提高信号对噪声的比值即信噪比. 根据人的听觉掩蔽特点，把信号强度维持高于噪声，例如高 20 分贝或 30 分贝，则噪声就被抑制. 即听觉上就感觉不到了.

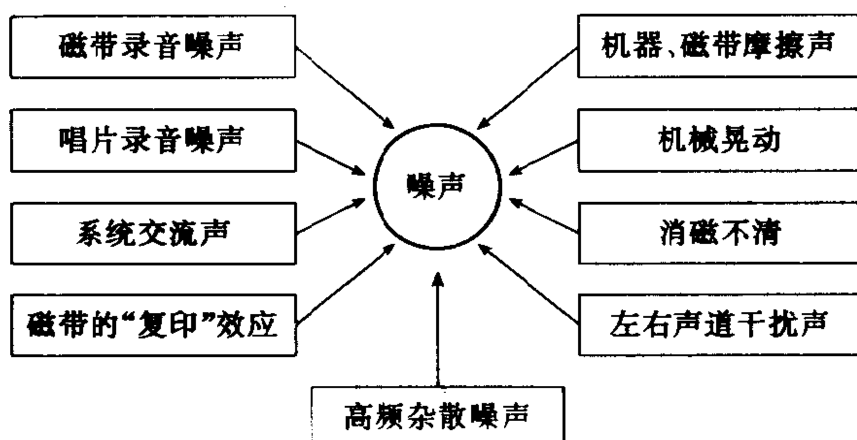


图5-15　电声系统中一些噪声来源

电声系统中各种各样的噪声有不同的来源，也要用不同的方法去处理. 例如：唱片的磨损噪声要用保洁、除尘，保持唱针的良好状态及唱针臂的平衡来解决；或者根本改变录音、复制方式和放声方式. 调谐器即收音机，它的高频噪声和杂散噪声要从调整天线的结构和角度来抑制. 用噪声滤波器可以把高频噪声“切”掉. 用“动态噪声限制器”切掉小信号——噪声一般是小信号——的高音，不会对听感有较大的影响.

最近几年来，在磁带录音技术方面发展了一种“杜比降噪系统”，简称“杜比”．有没有“杜比”，已经成为录放机档次高低的一种标志．“杜比”是英国一家名叫杜比的研究所发明的．利用人耳听觉的掩蔽效益，在信号大时，噪声不易被发觉，于是在大信号时正常录放音，而对中、高频（500赫）以上的小信号，提升10分贝（dB）录音，拉开了与磁带本底噪声强度的距离，然后在放音时又降低10个分贝，这样，信号的声音被复原，而噪声则被压低了10分贝．现在发展了各种“杜比”，如杜比B和杜比C……等，则是频段和分割段数或降噪的水平不同而已．图5-16是杜比降噪原理示意图．

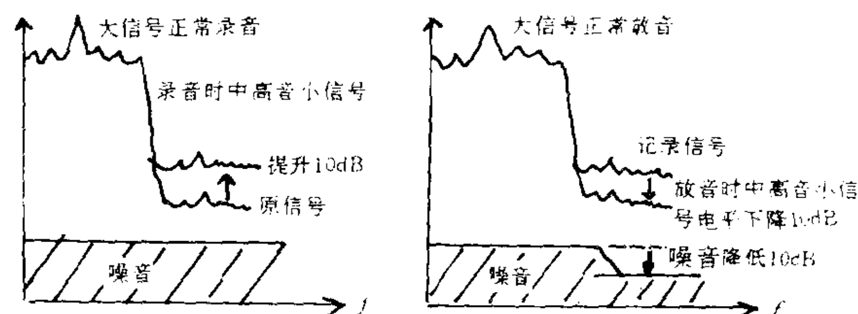


图5-16　杜比降噪原理示意

目前，降噪技术还在不断发展、改进、完善之中，还将会有新的降噪的方法出现．

§10　用“卡拉OK”唱歌为什么有好的自我感觉——人工混响、人工延时

十几年前，风靡日本、港、台、南亚以及世界各地的“卡拉OK”，现今已经在我国大陆城市里流行了．“卡拉

OK”原是伴奏带的意思，人跟着伴奏歌唱，当然要比清唱好得多．而且，由于这个伴奏带是事先准备好的，利用越来越先进的MIDI系统，可以有精心挑选的配器，高水平的乐队或电子合成音乐的演奏，还可以配以图形，即现今的卡拉OK不仅是用音响，还可以在电视屏幕上呈示相应的图像，打出字幕，加上适宜的环境气氛，做到“声情并茂”．这些，当然会使你唱歌时有很好的自我感觉，因此，“卡拉OK”是一种很好的普通音乐爱好者的自娱方式．

用“卡拉OK”唱歌有很好的自我感觉，还不仅是因为有上述这些外部的因素，而且唱“卡拉OK”的人会感到自己的声音不像自己了，比原来的嗓音浑厚得多，动听得多．这是因为你的声音从传声器接收，到从音箱放出来的过程中，经过了电声系统的“加工”制作．

电声加工可以增加混响感，即“人工混响”，我们知道，一个声音如果只有直达声，或少数早期反射声，那将是干巴巴的，频谱也比较简单．如果我们根据多次反射声的特点把频谱予以改造，增加了造成混响声的这部分频谱或包络，听起来就会变得有混响声了，这就是人工混响．还有，可以把声音的时值予以延长，就可以制造出许多新的效果，如厅堂效果——宛如在一个空旷的大厅里唱歌；如合唱效果——本来只有一个人或几个人唱歌，听起来像是一个合唱队；还可以做成回声效果等等．

现在，已经有成品的“效果器”，常常作为一个单元组合在电子合成音响系统中使用．于是，可以在相当大的范围内加以人工延时、人工混响以改变音色，或使某个频段的声音加强或减弱等，还可以用多个音轨来加工、调节，这

些都是音响师的工作.在组合音响甚至高级的收录机上,也有一些人工延时和混响的装置.而在“卡拉OK”机上,大都也有一定的人工延时和人工混响功能,因此,自己听自己唱歌就更“美”了.

§11 跳动的光柱和闪烁的光斑
——图示均衡器和频谱显示

当高级组合音响在工作时,你可以看到其中有一个部件上有一排一、二十个高高低低的推纽按频率高低自左而右排列,显示一种频率分布图;或者是还有一、二十个高高低低的光柱在不断地上下跳,时而中间起一个高峰,时而并排突起两、三个高峰,而且与音乐的高低和强度同步,即音乐声大,高峰也挺拔;音乐声低,高峰也疲软;高音越是强,高峰就偏右边;低音越是强,高峰就偏左边,这就是图示均衡器及其联结的频谱显示.有时,也用一排色彩不同的条纹来显示,条纹的色彩亮度随声音的强弱而同步地改变(图 5-17).

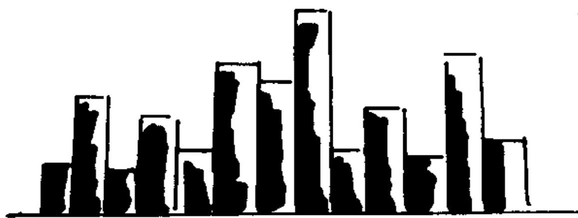


图 5-17 图示均衡器上跳跃的频谱显示

我们知道,实际上每一种音乐声,包括哪怕是一个人的独唱,一件乐器的独奏,都包括了一系列从低到高不同频率的声波,更不要说是乐队演奏了.如果声音中低频成分多,听起来就较厚实;如果是高音成分多,听起来就比

较明亮．有的人喜欢听低音成分多些，有些人喜欢听高音成分多些，各不相同．因此，一般收录机上就有一个调节高低音的旋钮．把旋钮指向高音部位，高音就比较强；把旋钮指向低音部位，低音就比较强，这是一个没有图示的简单的均衡器．

好的声音效果，其各段频率成分应该有一定的比例，录音的时候，录音师操作调音台就可以使各段频率的成分得到调整．由于各种乐器的基频高低是不同的，所以，也可以使各种乐器之间的声音比例得到调整，常见的是把频率由低至高分成 5 段或 7 段、10 段或 15 段，有经验的录音师或音乐家能听出哪里（哪个频率段）“空”了，即这个频段弱．哪里“鼓了个包”，即这个频段过强．通过均衡器可以把这些予以弥补．又因为每个人对音乐中频率分布的欣赏标准是不同的，因此，各位录音师掌握的尺度也不同，显示出各自的风格．

录音师也可以在录音时做些“手脚”，例如，有的录音机低音部分不太好，于是在录音时就把低音部分加强，这样，在这台录音机上播放时，低音就得到了补尝，因此，你播放购买收录机随机奉送的“试机带”时，听起来常常总是非常动人的，但在播放正常的磁带时，往往就不行了．所以在正式试验整机和评比设备、磁带、唱片时，是不准用均衡器而且要用标准试机带的．由于每个人的欣赏和爱好的不同，有人喜欢低音“浓”些，有人则崇尚自然，也有人有时要强调某种乐器．因此在高级的放音设备上也有均衡器，可以根据每人不同的爱好去随心所欲地调整频率响应．同时，这也可以弥补录音带质量上的某些缺陷，例如，

除了频响不平衡外，可以抑制某个频段上突出的噪声等.

§12 音箱中的扬声器越大，声音越好听吗？——扬声器系统和耳机的工作原理

一个电声系统的最后一组部件就是扬声器系统. 它的作用是把电能转换成为声能；还有耦合体即音箱，它可以使适当的频率被加强或者被抑止；再有控制电路，是在音箱上或整机中用来控制放声质量的. 要使扬声器系统放出的声音有好的质量，系统中各个部件都要有良好的性能，否则就会造成失真或引进噪声.

扬声器作的是传声器的反向动作，一般用动圈式. 在一些粗糙的试验里，还可以把它当作接收器使用. 扬声器一般用纸盆的，形状呈圆锥形. 你在大楼顶上或操场上看到的像“大炮”状的大号筒式的喇叭是喇叭式扬声器，特点是效率高，但失真大，一般家用收录机或高档音响设备中则用的是纸盆式扬声器.

人们似乎有一种概念，音乐系统所用的扬声器体积越大则声音越好，这有部分道理：一方面是，扬声器的纸盆越大，低音成分越强. 另一方面，如果音箱的面板越大，可以与波长越长的声波即低音部分产生共鸣. 音箱是一种声耦合器，可以改善扬声器的放音质量. 音箱有障板式的，即只有一块面板安放扬声器，并隔断扬声器前后的声波，以免产生干涉. 音箱还有背开式的、开口式的等. 音箱的放音音质取决于材料、结构、工艺，还有放置的位置、基座

等情况. 在大会场里，播放音乐的厅堂里以至家庭的居室里，扬声器和音箱如何放置是一个很大的学问哩！

现时，在街上，在各式各样的休息厅里，在飞机机舱内，在录音棚里，在音乐工作室里，到处可以看到头带耳机的人们，耳机实际上也是一种放音系统，它不但可以避免干扰，有轻便、价格便宜等优点，而且利用直接贴在耳朵上及头部的整体共鸣作用，可以听到很好的频响效果，也就是可以有很丰富的低音成分. 对于听立体声音乐来说，它更是特别容易体现出双耳效应. 随着耳机制造技术和工艺的改进以及立体声录音技术的改进，耳机有着越来越广阔的发展前景.

§13 组合音响系统
——一个家庭音乐工作站

在现代文化社会中，家中有一套高级家用组合音响已经是很普遍的了. 在工作之暇，欣赏你所喜爱的优美乐曲，由于采用了高保真度立体声、效果声和杜比降噪等技术，音响的重放效果已经可以接近大师们在你身边演奏，而且你还可以随心所欲地选择你之所爱. 当然，这也必将大大有助于音乐的普及和人们音乐素质的进一步提高.

一套高级组合音响系统所包括的内容也是不断发展的，就目前来说，它一般包含的是：声源部分有调谐器，即调频、调幅收音机（一般不含短波），磁带录放音卡座包括降噪系统、电唱机、激光唱机或磁带放像机，还可以接扩

音传声器或电子琴、合成器输入接口，有的还有数码录放音座、激光视盘．其控制部分有控制放大器、图示均衡器、人工混响和人工延时器，同时拾放系统即“卡拉OK”机．输出部分包括有功率放大器、音箱、耳机或电视机等（图

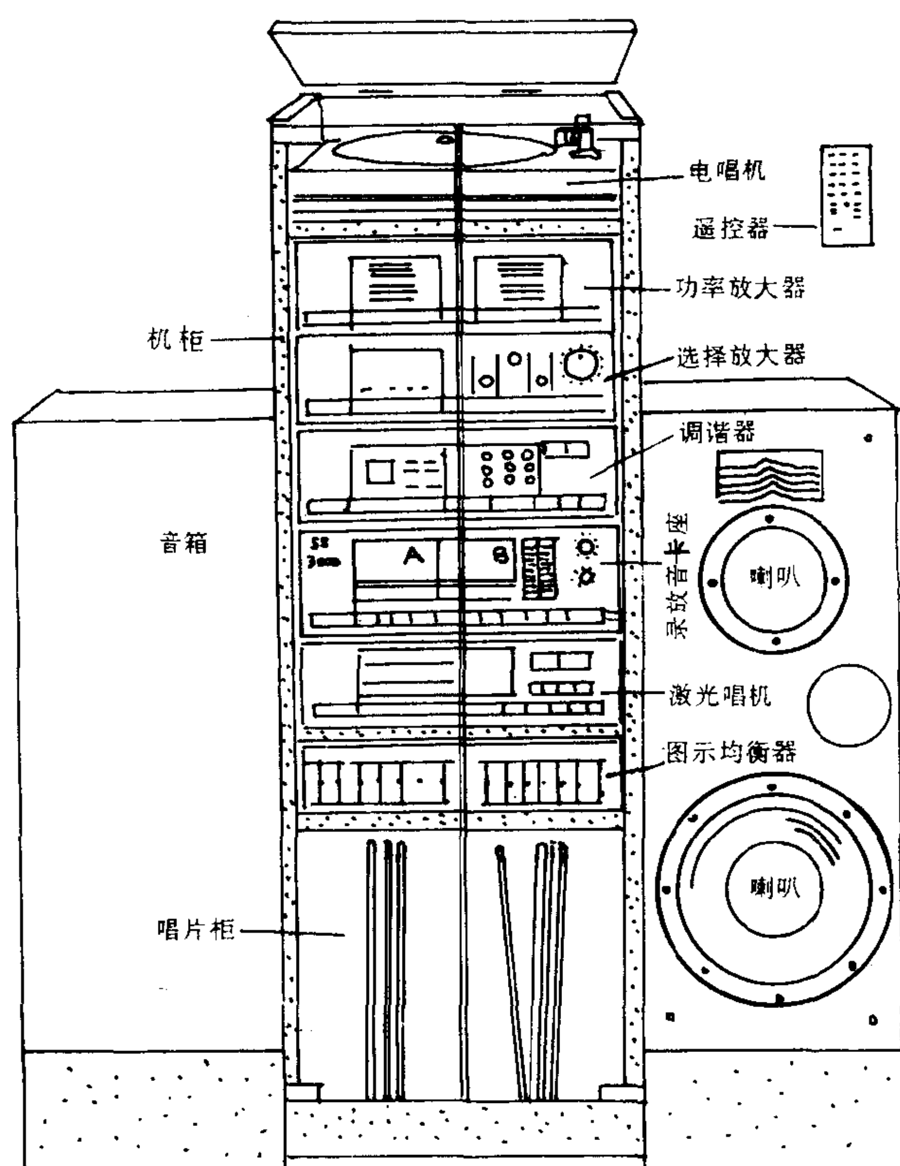


图 5-18　一台山水 3000 组合音响

5-18)．当然，有的组合音响系统只有其中一部分，有的其中几个部件是合在一起的．由上面所述可见这里已经包括了

音乐电声的主要技术和部件．有了这套系统，不仅可以收听广播、录音磁带、光盘，还可以用“卡拉OK”自娱．

除了听觉享受外，一套高级的组合音响也会给你以视觉美的享受．它是一套精美的工艺品，不论造型上、色泽上、质感上，到面板的布置和指示灯颜色的分布上，都是极富美感的．而且，不仅是静态美，还有动态美．图示均衡器、录放音座和功率显示器上的灯光和光点随乐声而跳跃、闪烁，更加衬托出了音乐的美．如果你在一个夜深人静的月光之夜，独自领略、品味音乐的意境，你会另有一番韵味．

目前，家用组合音响越来越向自动化、遥控化发展．选广播电台、选节目段、开启、止动、暂停、音量大小、录放音、进带、倒带等等都可以遥控．而且，改变工作单元如从听激光唱片到听广播或录音磁带等，也都可以用遥控解决，即所谓全遥控．有尽量多的预置，如选台，选节目段，重播，预置关机时间等．还有许多的自动功能，如自动倒带、自动切换、自动停机、自动退回、自动调整频响、自动保护等等．

一套高级组合音响也是一个音乐电声实验室，可以用均衡器调整频响，抑制噪声，或试验突出失真的效果；可以改善录放音电平，改变左右声道配比，对单声道与双声道或立体声的效果进行对比；可以比较不同的话筒、音箱、耳机及不同使用方法的效果；可以试验人工混响的效果等等，这些都可以直接感到听觉效果．

当然，组合音响还能给你的音乐实习带来许多好处：分辨不同乐器或乐器组合的音色及效果，分辨各种器乐和声乐的主要频率区间，学习各种配器方法、伴奏方式、旋律

音型、和弦应用和音乐织体，体会合唱效果、合奏效果等等. 这些都必须凭藉音色保真、层次清晰、频响均衡、信噪比大，动态范围广，才能很好地实现.

很好的把一套家用组合音响掌握和使用起来，会使你增长不少知识，增加无穷的乐趣.

§14 电子琴的特点——从物理机制上探讨电子琴的音色

1985年前后，我国开始掀起一股“电子琴热”. 生产电子琴的厂家蜂起，有数百家之多，年产量达到数百万台，到处是电子琴培训班的广告. 迄今为止，估计国内电子琴的占有量已达8位数. 当然，过了这一阵“热”以后，现在已逐渐趋于稳定. 低劣的产品已被淘汰，高质量的保留了下来，在乐器世界中占有了一席之地.

电子琴是一种电子乐器，是靠电子元件的电振荡或计算机芯片产生的电振荡或晶体振荡器激发振荡通过换能而发声的. 它不同于电吉他、电子扬琴等电声乐器. 电声乐器是用传统的乐声发音的方法发声，用电声放大器放声. 电子合成器实际上也是电子琴，只不过合成器是可以制造出千变万化的音色的电子琴，而电子琴则是音色固定的合成器而已. 另外，合成器不带扬声器，而电子琴则是有扬声器的.

电子琴有许多优点，如音准好，这因为一般电子琴都是用石英振荡器作为标准频率，然后再分频、倍频；音色

丰富，即使是最简单的电子琴也会有好多种音色，因为只要改变一下波形或频谱就会有音色的变化；可以有自动伴奏；音量大小可以通过放音系统控制；有比较宽的音域；还可以记忆、模仿等等.

但是电子琴的乐音总是使人感到比较呆板，这主要是因为：频率过于准确，虽然有人工颤音之类的变化，但都是按照一定的“模式”反复的，因此缺乏活力；音量也不能随演奏而变化；力度变化也不能自如；速度也非常刻板，不能实时改变等. 因此，不能很好地传送出音乐作品的丰富内含和细腻的感情.演奏电子琴有较多技术操作的成分，甚至有人把这说成不是一门艺术，只是一种技术，这可能也太过份了.

由于电子琴的频率是由标准频率分频或倍频而来的，因此，它与人耳的听觉反应是有差别的. 实验及经验证明，人耳听高音“偏低”，听低音“偏高”. 这“偏高”或“偏低”是指在高音区，按倍频提高频率，听起来不是八度音，而是高音似乎不到八度. 因此，钢琴调律时，在高音区要略略把频率提高一些，最高处约有 20—30 音分，在低音区要略略把频率降低一些，最多也是几十音分，不论是中国人还是外国人都是这样，但也因人而略异. 所以严格按倍频程发音的电子琴听起来也会感到不舒服的. 对于一些对音调感觉灵敏的人，就会觉得是音不准了. 图 5-19 所示是钢琴的调律曲线与电子琴的调律曲线对比.

用电子琴去模拟各种乐器的音色也是不像的. 这是因为一般电子琴是自始至终按同一个波形包络或频谱去产生模拟某一种乐器的音色的. 然而，事实是，就是同一种乐

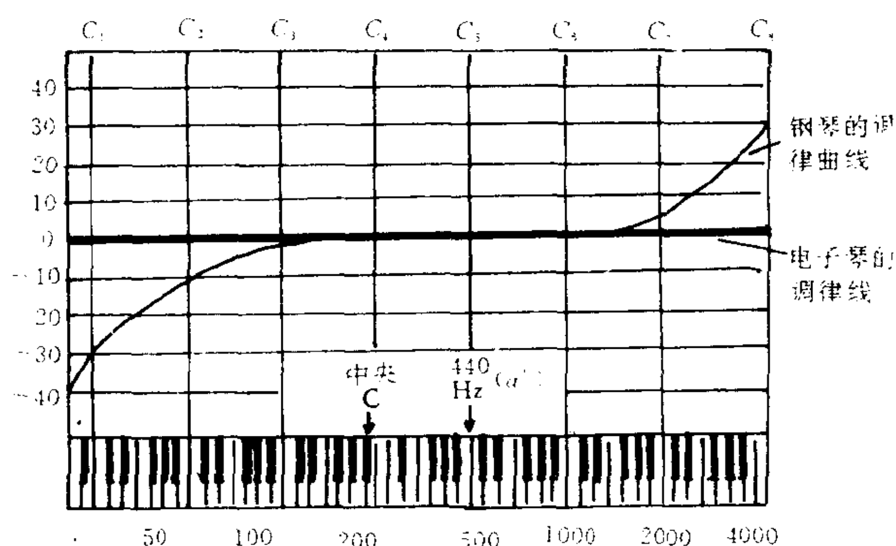


图 5-19　钢琴和电子琴的调律曲线

器，低音部分与高音部分的频谱分布也会有很大差别，何况各件乐器之间也有很大的不同之处；另外，还与演奏有关. 这就必然会导致“电子琴模仿什么不像什么”，而只保留有电子琴的“电味”即其特点而已.

要把电子琴的颤音与小提琴相比，延音与钢琴的相比，当然也是相差十万八千里的. 小提琴的颤音实际上是既有频率波动又有强度波动，而且有个起始、持续和结束，其频率、力度都是有变化的. 钢琴的延音如前所述，是包括了整个琴板的共鸣，不像电子琴简单把一个或几个音延长. 因此，这里又显示出它的特点来.

其实，这特殊的“电味”不一定是件坏事，电子琴蛮可以不去模仿这、模仿那，而去显示自己与众不同的“音色”，发挥电子琴的优点，去开发有特殊效果的“风格”，有自己的特色，岂不更好！

§15 可以制造任何声音的乐器——电子合成器

音乐电声的一个重要内容就是电子音乐．电子琴的出现，开辟了音乐的一个新天地．但是自从电子合成器问世以来，电子音乐就又进入了一个更高的阶段．

本世纪 50 年代，出现了第一台电子合成器．那时它还

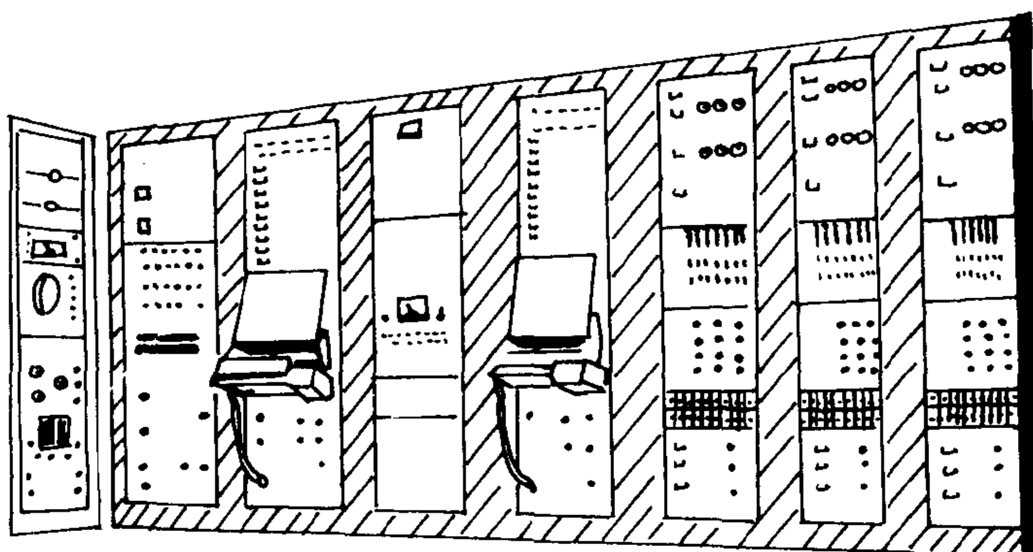


图 5-20　50 年代出现的第一台合成器

只是一个庞然大物（图 5-20），利用计算机技术，输入信息，可以改变音调、音量、速度、波形及包络等．但是很费劲，花费很多时间才能产生几分钟的音乐．到了 60 年代，合成器装上了琴键，已进入商品化，并且体积也大大减小了．

合成器实际上是一台声音的频率合成仪，可以制作各种声音，改变各种音色．可以把制作好的音色贮存起来取用，可以存在合成器里，也可以把制作好的音色贮存在

ROM 块（只读存贮器）中或软盘里. 有一种采样合成器，还可以采集某种声音的音色，然后在整个音域里重放，重放时还可以改调、改速度、改音色. 合成器还可以当作电子音乐的音源，也可以作键盘输入用，还可以通过 MIDI（乐器数字接口）系统作为计算机音乐系统里的声音发生器或控制别的部件的主机等等.

用合成器制作声音的方法很多，起先是把若干个正弦波振荡器连在一起，改变各自的频率、振幅，就可以产生不同音色. 后来，又采用压控方法，对频率、振幅、波形、时值、包络线等进行调制. 近年来，又采用了调频的方法，波形记忆方法，脉冲数码调制方法等. 也可以把以上各种方法混合使用.

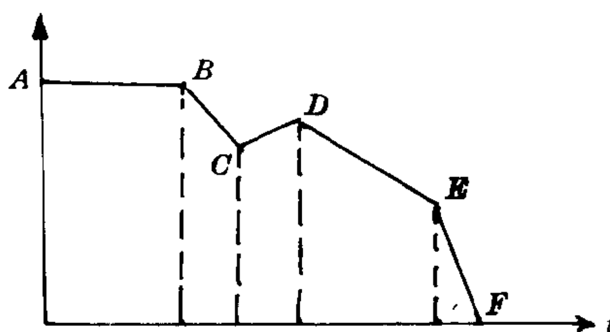


图 5-21　一种合成声音波形的方法

例如有一种改变波形包络的方法，把波形包络分成几段（如图 5-21）即 AB、BC、CD、DE……等，通过改变 B、C、D、E 等点的位置，即相对幅度以及改变各段的斜率，就可以进行音色设计了.

目前，由于电子音乐的普及，电子合成器可以解决相当一部分的歌唱及舞厅的伴奏问题. 可以在事先由一个人制作伴奏音乐乐曲或背景音乐，而不需要乐队，或者部分代替乐队. 由于制作和修改方便，成本低，音乐丰满，所以市场需求量很大，因此，世界许多国家的厂商都不断地在发展并推出新的型号，每年都要更新换代. 当前的趋势

是不断采用先进的技术，以取得更多、更好的音色；扩展容量，这包括扩展槽口，增加软盘驱动器或硬盘，增加最大发音数目，增大存贮量，扩展琴键等；使功能多样化，如把一台合成器变成同时可以发二种、四种甚至几种音色，即一台当作几台使用，或者把鼓机的节奏发生器功能、音序器的编辑功能放入合成器，让合成器代替计算机的主机等；扩展功能，例如有的合成器有“跟随”功能，即经预置，每一个音后可以跟随一个二度或三度音，“重叠”功能，轻奏或重奏时可以发不同音调或音色；另外，合成器还向轻便、使用操作方便等方向发展.

§16 电脑音乐演奏系统——MIDI

目前，用计算机控制合成器及其他一些部件，构成一个电脑音乐演奏系统，已经在录音、演出，特别是小型舞会、茶室中大量普及了. 由于整个系统是用MIDI——乐器数字接口连接起来的，所以有时也统称MIDI系统（迷笛系统）.

一套电脑演奏系统是把电脑作为主机，还包括音源或音乐输入系统、效果器等，用MIDI连接起来，实行录音、放音或人机合奏等，如图5-22是MIDI系统示意图.

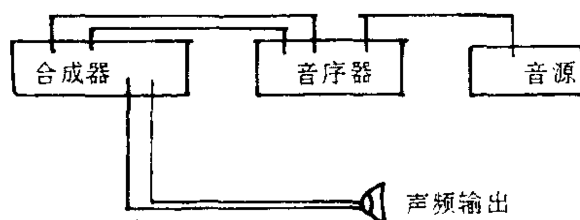


图5-22　MIDI系统

音乐电脑是MIDI系统的中枢，可以用音序器充当，也可以用专用计算机或通用计算机充当. 音序器是一个控制中心，可以有记录、贮存、编辑、放音等功能. 一般的音序器有8至16个音轨，即可以记录、存贮8至16条录音带，然后一起或任意选择重放. 实际上，如果进行多次合轨，则有效轨数可以更多. 如果用计算机代替音序器，其容量更大，音轨更多. 音乐电脑可以附带显示器、打印机等. 通过MIDI，也可以使任何一台MIDI系统中的部件执行部分控制功能. 图5-23表示用一台主机通过MIDI控制其他乐器.

用键盘式合成器作为音源，可以实时输入. 也可以从计算机或音序器“键入”音乐. 也可以把“音源块”作为音源，音源块实际上是一种不带键盘的合成器. 也可以改变音色，制作出许多不同的音色. 鼓机即节奏发生器，也是一种合成器，相当长一段时间里仍是独立的部件，但也可以放在音源块或合成器里，已有逐渐被取代的趋势. 电子钢琴也是一种合成器，这是由于钢琴本身有各式各样音色，而且钢琴的音色比较特殊，不易制作，所以有成品的电子钢琴出售.

随着合成器的发展，音色的改善，贮存的扩大，电子钢琴也有逐渐失意的苗头. 但是，最近发展了一种高级数码钢琴，集合成器的功能和钢琴功能于一身. 又臻红火. 以上这些合成器都可作为MIDI系统的音源.

MIDI系统中还可以有“效果器”，实际上是人工混响及人工延时器，是一种对声音进行加工的部件. 从发展趋势看，有些功能也逐渐为音序器或电脑所替代.

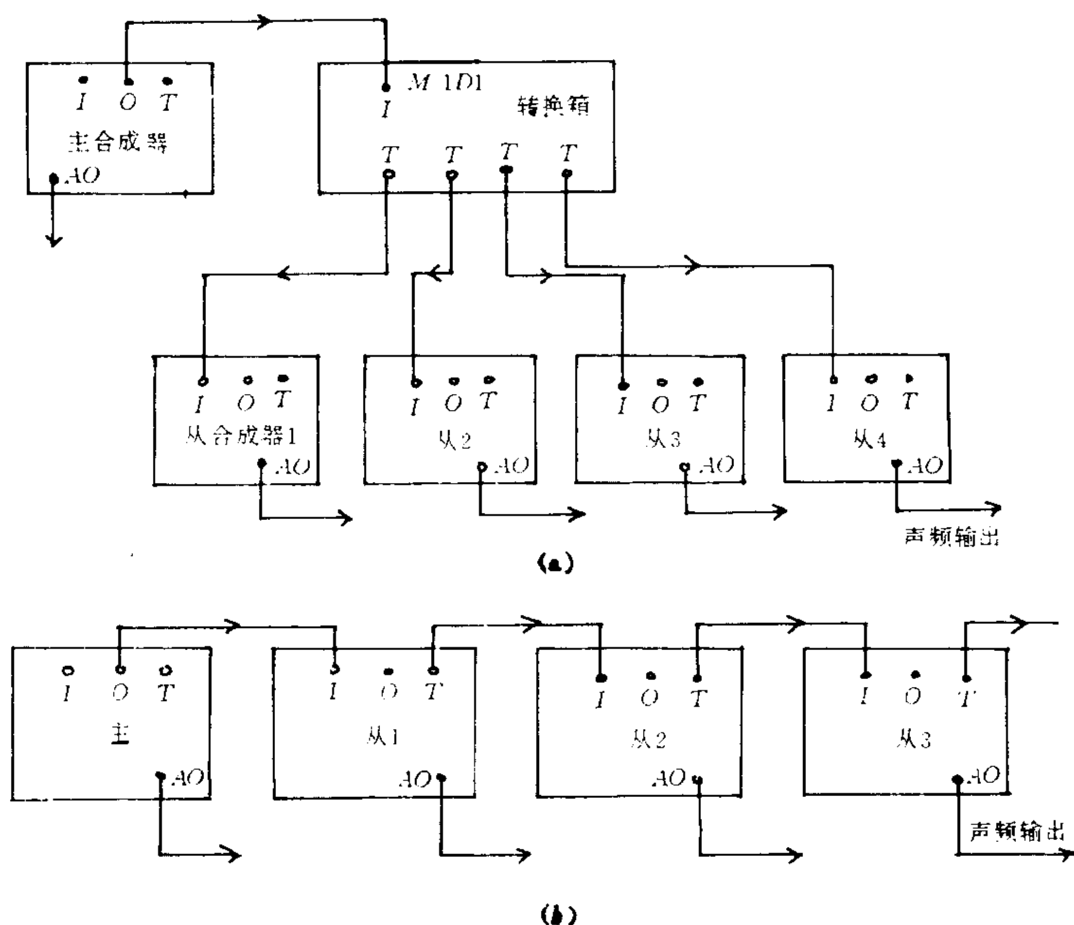


图 5-23　(*a*) 通过 MIDI 转换箱

(*b*) 一一串接

声频输出部分包括调音台、功率放大器和音箱等，这些当然是不可缺的.

所有这些都由 MIDI 连接起来，每一个部件或乐器上都有接口，即 MIDI 插孔，通过专用的 MIDI 线连接起来.

现时，许多高档的电子琴及一般个人计算机都有了 MIDI 接口. MIDI 已开始进入家庭. 利用家庭中使用的电子计算机、电子琴或合成器，加上组合音响放音系统，在家里“玩”音乐，包括制作“卡拉 OK”带、作曲、演奏等，已经不是遥远的未来了.

第六章
室内音乐声

§1 广场上的演出和室内的歌声
——开室与闭室的声学效果、室内声的组成

许多人都曾有过这样的实际体验：在音乐室里练习唱歌，会感到声音很大，效果也很好，但一上台演出就感到声音小极了，好像没有声音似的，于是就更不敢放开喉咙．结果越唱心里越没有底，造成恶性循环，最后就砸锅了．还有，在广场上演出时，感到非常吃力，要扯着嗓子唱，效果也还不理想．再有，在礼堂里的台上唱歌，总是觉得唱出去的声音会往后拖，于是为了与之"合拍"，就越唱越慢，效果很糟．另外，如果在浴室里洗澡时唱歌，你会觉得自己的嗓音非常浑厚，自我感觉越来越好，情不自禁引吭高歌．因此，在学校的浴室里总是歌声嘹亮的．这些都是因为，你所听到的歌声的响度、音色的好坏都是与声学环境有关的．

让我们先来看一看，假如你是在一个房间里，你所听到的是从声源发出的声音，包括直达声和反射声，如果有一个扩音器，那还可以有反馈声，即经扩音器扩音后又回

到拾音器的声音．顾名思义，直达声是直接传到耳朵里的声音．反射声则是通过侧壁、后壁、顶板、地板或舞台上的反射板、侧板等反射后到达的声音．在反射声里又可分为一次反射声、早期反射声和混响声（图 6-1）．早期反射声是反射次数不多的声音．混响声是经过各个反射面的多次反射后，并连续地到达听者耳朵的声音．

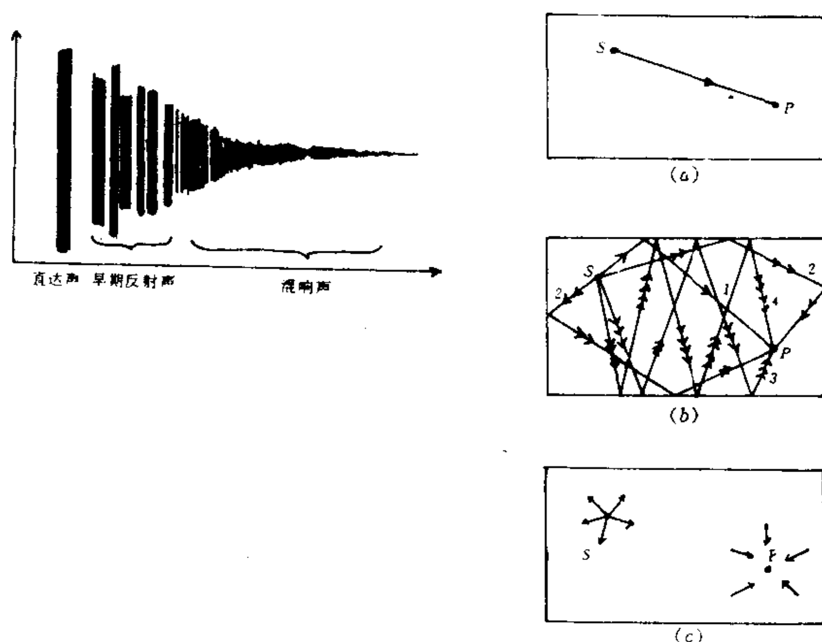


图 6-1　各种室内声

（a）直达声　　（b）早期反射声　　（c）混响声

于是，前面所述的一些现象就很容易解释了．在广场上唱歌，没有反射声，而且能量向四面散失，所以歌唱者耳中听不到自己唱出的反射歌声，感到很吃力．在室内听音则不然，除了直达声，还有各种反射声，因此声音更响、更丰满．

在广场上唱歌，还能有从地面反射的微弱声音．有一种声学实验室，叫作消声室，室内上下左右都用高吸声材

料做成，把各个方面的反射声几乎都吸收了，因此，听什么声音都会感到很弱并非常“干”. 有一种“半消声室”，是有地面反射的，即模拟广场效应.

房间的大小也与听音效果有关. 房间越小，声音在一定时间内在室内反射的次数就越多，多次反射声融合在一起，听起来混响效果就好，这就是浴室里唱出的歌声好听的主要原因. 房间太大，直达声与从远处的反射声“连”不起来，就会听到“回声”，一个声音变成两个或多个分离的声音. 因此，像人民大会堂这样的大厅就必须避免这种现象的发生. 房间的尺寸也同声音的反射有关，房间越大，声音在相对的两墙之间形成的驻波的波长就越长，即在某个或某几个频率上声音会相对增强. 你可以再做一个实验：在一间空房间里把门窗四面关好，试着从低音连续唱到高音，你会听到有某个音是特别“突出”的. 有些作声学测试的房间，如试听室，则要避免这种效应.

当然，房间如果不密闭，那就不是完全的“闭室效应”了.

§2 一个好的音乐厅在音响效果上有哪些要求
——音乐厅设计的声学标准

不管是音乐厅、歌剧院或者是礼堂，在听众欣赏音乐时，都有一些最起码的要求：

首先，在厅堂内各处，不管你是否使用扩音设备，声音都要有一定的响度，而且，各处的响度要比较均匀，不

得有“焦点”——即声音被“聚焦”而特别响的地点，也不得有“盲点”，即声音由于某种原因而变得很弱的地点．这种现象并不少见．如果你问某些细心的、注意声音效果的剧场工作人员，他会告诉你哪几个座位上的声音特别弱，哪些座位上的声音特别清楚等．北京有个剧院，它的前几排座位恰好是一片“盲区”，眼看着自己面前不远处的舞台上，演员在卖力地张口，但听起来声音却很弱，要“竖起耳朵”很费劲才能听清．

反射声的存在是必须的，因为有了反射声，声音才显得有“活力”．反射声也要均匀，某些声学缺陷往往是由于反射声不均匀造成的．舞台上空悬挂的反射板的数量、方向及反射能力、制作用的材料，舞台和大厅顶上天花板的高度、形状等，都与反射声特别是早期反射声有很大的关系．一般希望低频反射声略强于高频反射声，这样听感就比较丰满．

近期的研究表明，侧面反射声对于听觉来说是很重要的．古典音乐厅，如每年元旦向全世界播出新年音乐会的维也纳音乐厅的“金色大厅”，是立方矩形即“鞋盒式”的．许多现代的圆形或放射形的音乐厅的演奏效果往往不如立方矩形的好，被认为是由于立方矩形的大厅侧面距离短，因此侧面早期反射声比较强的缘故．所以目前“鞋盒”又时兴起来．北京音乐厅就是“鞋盒”式的．

直达声与第一次反射声到达厅内同一处的时间间隙不能太长，如果长了，听起来就会有断开的感觉，更严重些就会有“回声”了．这个问题对于体积大的剧院是个特别需要注意的问题．例如，如果剧场特大，前排中间座位的

听众所听到的从舞台上直接传来的直达声与从最远处的反射后壁或后排顶棚来的第一次反射声就会“脱节”. 像人民大会堂这样大的大厅，是利用各座位上的小扩音器来解决的.

要有一定的、合适的“混响时间”. 这一点我们将在下一节中再作进一步的叙述.

对于各种频率的声音，要有均匀的反射，或者是选择“优化”的反射. 不能有某些频率的声音反射太强或太弱，产生相对于频率的“焦点”或“盲点”，即声音的“着色”或“褪色”现象.“合奏效应”好，即是高低音调的乐器都得到均匀的声响. 常有的是往往高音部或低音部或某种乐器过于突出或过于被抑制. 如果录音间里有了可以显示的“着色”现象，那么原来节目的频率平衡就会被破坏，导致声音频谱的改变，重放时就会失真. 当然录音师或调音师可以作一些弥补.

另外，还应尽量减小外部噪声的影响.

§3 音乐厅、歌剧院、电影院音响设计的主要问题——闭室的混响时间

前面我们已经讲过：同一个音乐声源，在不同的环境条件下，即使是由同一个人去听，也是会有不同效果的. 这主要是因为从房间周壁或其它物体产生反射的效果. 那么，我们可以用一些什么样的量去描述这个环境条件的差别对听觉的影响呢？其中最重要的一个，也是历史最久、至今

一直沿用的量，就是“混响时间”.

一个房间的混响时间是：声源停止发声后，声音的强度（声能密度）降低为$\frac{1}{10^6}$即百万分之一，或衰减 60dB（分贝）所需要的时间. 一个房间的混响时间越长，则“余音绕梁”越久，听起来声音越“厚实”或“浑浊”. 混响是由于声音在房间内多次反射而形成的，因此，混响时间的长短与房间的大小、四壁或室内的吸声状况以及频率等有关.

不同用途的房屋要求不同的混响时间. 混响时间太短，声音听起来很单薄、干瘪；混响时间过长，则又会使声音变得模糊、含混不清. 比如，演奏管风琴的乐室，混响时间要求较长，以便更加发扬管风琴的和声丰满，低音浑厚、气势磅礴的特点. 音乐厅的混响时间也要求稍长，以使听众感到和谐、圆润. 对于音乐试听室和音乐演播室，其混响时间比音乐厅要求短些，以对音乐源有个准确的评价. 歌剧院的混响时间则要求再稍短些，因为要兼顾歌唱和对白. 对于歌唱，混响时间要长些；对于对白，混响时间长了字音就不清晰了. 电影院则因为可以在制作电声时加入人工混响，所以房间的混响时间就可以更短一些. 至于消声室，则本来就要房间不反射声音，混响时间就趋于零.

不同大小的房间要求的混响时间也不同，房间容积大，要求混响时间大些，以减小“空空荡荡”的声音感受；房间小了，早期反射声对室内各处的影响大，能量强. 因此混响时间可以短些，也能达到同样的听觉效果.

在同一间房间里，对于不同频率，混响时间是不同的. 频率越低，混响时间越长，这是因为物体对高频的吸收要比低频强些.

室内是不是坐了听众，混响时间也是不同的．满场的混响时间要低于空场的混响时间．这是因为每一位听众都是一个吸声体，场内吸声强，反射声的能量就会减小，混响时间当然就短了．

由于混响的作用很重要，人们已经会用机械的方法制造人工混响．而目前主要是在电路上作文章．稍加调制，就可以得到各种不同的人工混响，而且是可以自由调节的．

§4　怎样的舞台才合乎规格
——舞台的声学要求

前面我们已经讲过，对于一个音乐厅或歌剧院大厅要有一定的声学要求，而大厅内好的音响效果也离不开舞台上的“声源”质量．

虽然，音乐厅与歌剧院在整体结构上有所区别，歌剧院的舞台是有乐池的，而音乐厅的舞台是演出区与观众席连成一片，使演员与听众无论从音响效果或是心理上都得到更好的沟通．然而不管是音乐厅或是歌剧院，对于演员演出的这块场地——舞台，都有同样的声学要求．

首先，舞台上各个位置的声音都要能很均匀传播出来．这个均匀包括总体音响和对于各种频率的分布都均匀，否则，就会造成在舞台的某处传出的声音强，另一处传出的声音弱，或者是一些乐器的声音强，另一些乐器的声音弱．这可能是由于站位，也可能是由于频率响应．声源要均匀，这是“合奏效应”好在声源部分的保证．“合奏效应”体现

在舞台上的声音传出去应是融为一体的．这就与舞台的形状，背面、侧面和顶部的反射，乐队在台上的占位等都有关．以各个声部尽量靠近，舞台上各反射面较贴近，使反射声回来得快为好．

舞台上的演奏者或演唱者应能听到自己的声音和旁侧的演奏、演唱者的声音．这样，得以把握本人的演奏或演唱速度，求得协调和有感情交流．有经验的演员都知道，仅仅看指挥是不行的，要主动与同台演出者相互协调交流，而这种协调和交流则是基于听觉的反应．

音乐厅或歌剧院的舞台都有一个特定的传播音质较好的区域，也有一些适应于独唱、独奏好的位置．有关工作人员，应把握好这些．

有些音乐厅装有大型的管风琴，台上管风琴风管的位置及排列也与音质大有关系．

歌剧院是有乐池的，乐池也是舞台的一部分．乐队在乐池演奏，要解决几个声学问题：一是乐队的声音能均匀并融合地传给听众，这靠乐池上面顶板的反射，也常常依靠电声系统；二是乐队的声音要传给舞台上的演员，除了直达声外，主要靠乐池里和舞台上的反射，或靠扬声器系统；三是乐队的音乐不要成为一道音障挡住演员的歌唱．这主要是乐队与演员声音响度的对比要适当，是一个声掩蔽的问题．

§5 剧院、电影院的墙面
——吸声问题

声波在入射到墙壁的表面上会发生一部分被反射，一部分被吸收. 如果吸声部分多，能量就消耗得多，那么反射的部分就少，在室内的混响声就弱了. 因此，声的吸收与房间内的音质有很大关系. 电影院墙壁上的吸声材料就是为了减少声的反射，降低房间的混响时间的.

各种材料的吸声能力是不同的. 光滑坚硬的表面吸声能力就很弱. 一些多孔材料，包括毛毡、麻、纤维、刨花板、玻璃绵、岩绵、泡沫塑料等材料，吸声能力较强. 由于声波进入这些材料中的间隙时，在其中起摩擦效应，能量很快就消耗了. 剧院的幕布，家里的帘幕等都是有吸声能力的多孔材料.

各种材料对不同频率的声波的吸收也是不同的，如多孔性材料主要吸收高频声，薄板主要吸收低频声，而穿孔吸声板可在共振频率区吸收最强. 物体放置的方法也影响吸声，如帘幕贴墙挂只对高频吸收较好，相隔一定距离就能较好吸收中频.

把木板、胶合板扎上一定的小孔，并在板后垫玻璃绵、海绵等，钉在龙骨上，再支在刚性墙上，即成为一种共振结构的吸声材料. 它有一定的共振频率，在共振频率附近的声波就被很强地吸收. 对面板的厚度、重量、穿孔率以及空气层的厚度等加以调节，可以调节共振频率，从而调

整吸声频段. 共振板结构是一种很强的吸声材料. 在一些播音室、试听室里常常会看到.

不穿孔的薄板后留有一定空腔,形成低频共振吸声体. 北京有些老剧院听音乐很"干",就是这种吸声体把低频声吸得太多造成的.

厅堂里的人、家俱等都是吸声材料. 因此, 剧院大厅的混响时间, 对于满场或空场是不同的. 满场的混响时间要比空场来得小.

"尖劈"吸声体是一种强吸收材料, 能吸收 99%以上, 只在消声室里用它. 如图 6-2 表示两种吸声材料.

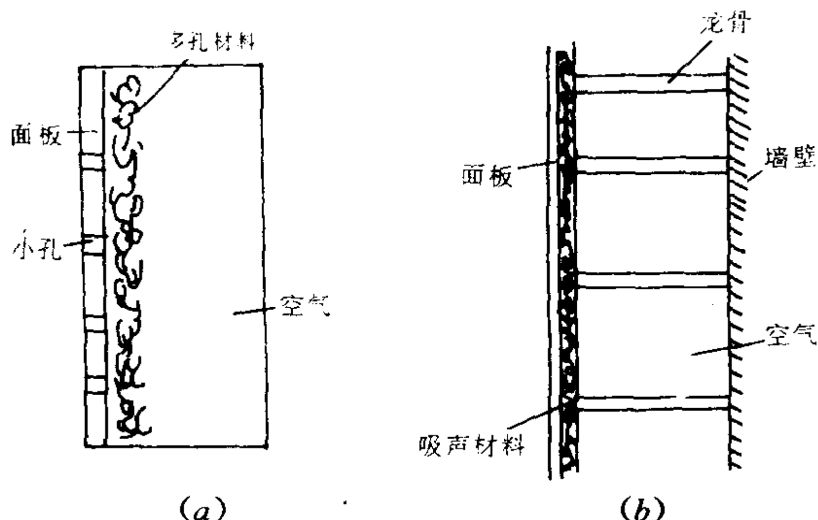


图 6-2 吸声材料

(a) 穿孔吸声材料 (b) 薄板共振材料

在一些老式的剧院和电影院的墙面上, 可以发现有粗糙不平的"尖突". 这是一些不懂声学设计的建筑师故意用泥浆刀"刮"出来的. 他们认为这种"尖突"能起两个作用: 一是吸声; 二是产生"漫反射". 其实这种灰浆是密实的, 没有孔隙, 不会有多孔性吸声的性质;"尖突"的厚度又比声音波长小得多, 起不了漫反射作用. 实验证明, 这种墙面与平坦的水泥抹灰墙基本具有相同的声学性质, 只

是增加了积累灰尘无法打扫的麻烦.

§6 怎样使室内清静些
——室内噪声和隔声

当你在剧院或家里听音乐时，街上的汽车喇叭声，门外嘈杂的人声，人们走路的脚步声等，是一种十分讨厌的干扰声源. 这些不需要的附加声响统统都是室内噪声.

室内噪声来自室内或室外. 来自室外的噪声有通过空气传来的，如交通噪声，附近工厂或工地的工业噪声，操场上高音喇叭声，各种人群发出的声音等. 来自室外的噪声还有是通过墙壁传来的，如从通风机、洗衣房、锅炉房、厨房等地传来的振动声，夜深人静时隔壁人家的说话声和关灯声等.

来自室内的噪声有剧场内人的走动声，坐椅吱吱声，人的咳嗽、说话、翻动说明书的声音，家里时钟的嘀嗒声等.

噪声是讨厌的. 除压低噪声源外，还应采取隔声、消声、隔振的措施. 对空气声是隔声和消声，对固体声是隔振. 常用的措施有：

把音乐厅、歌舞剧院的位置选择距闹市区或街道远一些.

改造建筑结构. 如北京音乐厅曾专门改造了地基，采用了减震措施，以减少地面传入的外界振动；还专门修建了侧厅，作为正厅的隔声室. 还有，房间用双层或多层结构，少开窗户等；用专门的隔声门、隔声墙；减少固体噪

声源，如对鼓风机等采用加消声器；制定一些规则、如在演出过程中不准入场、出场；采用特殊纸张印制说明书，使翻动时不出声响；不在剧场里吃东西、私语或弄出声音等等，这要靠提高国民素质来解决.

至于居室房间里的噪声，也可以采取相应的方法减少.首先是把可以去掉的噪声源去掉，然后是采用隔声、吸声等措施，如用双层窗户、加窗帘、铺地毯等.

§7 怎样使你房间里的音乐更加动听些——居室内的声学考虑

前面讲了许多关于音乐厅和歌剧院的声学要求. 在实际生活里，我们一般人谁也不会天天去音乐厅欣赏音乐，我们所接触和面临的音乐环境最多的还是自己的居室. 就目前我国的住房条件来说，常常是把音响、电视机或钢琴等音乐源放在不大的客厅或卧室中. 因此，怎样才能使你听到的音乐在现有条件下有尽量好的效果呢？这是一个非常实际的问题.

如果你可以在几间居室内选择一个房间放置音响设备的话，那么我建议你选择房间较大的一间；如果面积相仿，形状不一的话，那你可以选择较长的一间. 矩形的房间可以在调整音质方面比同样面积的正方形房间有更大的余地.

当前，一般家庭的音乐主要是电声音乐，通过音箱重放出来. 因此，在录制唱片或磁带时，已经考虑了各种效

果如混响时间等，所以，房间以少一些混响的影响为好. 地面上的地毯可以有效地吸声，窗帘、帷幕、被褥、沙发等都是好的吸声材料.

音箱或扬声器的位置是可以调整的. 把音箱放得恰到好处这一点很重要. 平放时音箱的高低以与听音者的耳朵在同一水平为好. 音箱放在什么东西上要有选择，如果基座太软，如放在地毯上，就会把许多声音吸收了. 也不要放在可能引起与别的东西发生共振的物件上. 因此，以放在大件的坚实的基座上为好. 对于立体声来说，两个音箱要拉开距离，才显出更好效果. 听者的最佳位置是与两个音箱成为等边三角形的第三顶点，这一点前面已经讲过. 音箱靠墙放或靠墙角放，一般听音效果要好些. 也可以面对着墙壁放置，形成“虚”的声源. 由于各种音乐或乐曲的频率成分和混响要求不同，音箱放置的最佳位置也不同. 每个人的听感和欣赏标准都不同，最终按个人听起来好的效果为准，因而要反复试验. 常常有这种情况，把音箱稍稍挪动一下，音质就有明显改善. 图 6-3、图 6-4 展示室内音箱的各种放法.

钢琴已进入许多家庭，房间里钢琴的放置位置除了从美观上考虑以外，也要注意声音效果. 主要的一点是钢琴的后背离墙壁的距离不要太近，因为钢琴的声音主要是从背面的琴板传出的，过分贴墙对钢琴的音量和声音的共鸣都是不利的. 把钢琴放在木板地面上常常有改善音色的作用，琴上的盖布会起吸音和遏制振动的作用.

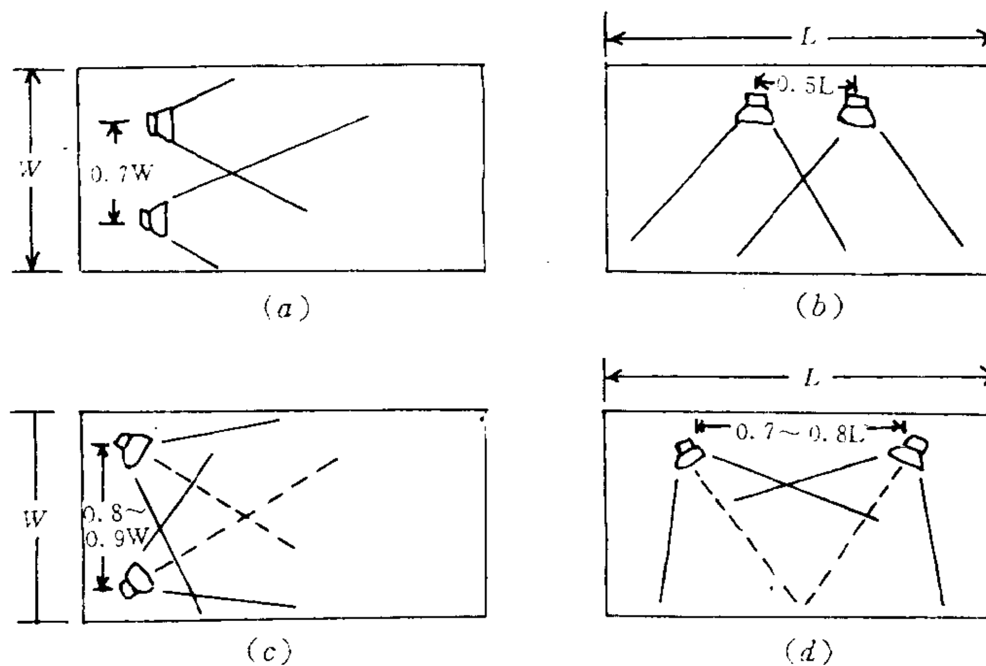


图 6-3　室内音箱的放法

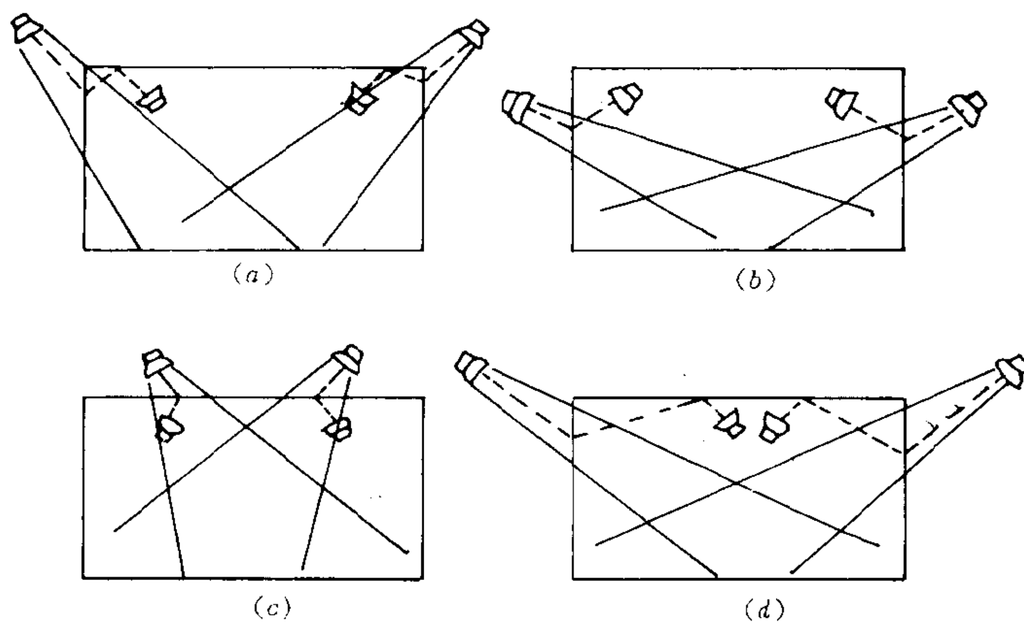


图 6-4　室内音箱的放法（虚声源）